

**СТРУКТУРНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ (ПП)  
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ (ИС)**

## ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ

Нейтроны – упругое рассеяние

Протоны

Дейтоны →резерфордовское  
Альфа-частицы рассеяние

Электроны

Гамма-кванты → (<5 МэВ) фотоэффект,  
комптоновское рассеяние,  
рождение электронно-  
-позитронных пар (>5 МэВ)

$\text{Co}^{60}$  ( $E=1,25$  МэВ) образует электроны  
со средней энергией  $\sim 0,59$  МэВ

Атомы      Вакансии и  
отдачи → смещенные в  
                 междоузлия  
                 (пары Френкеля)

## Структурные радиационные дефекты в ПП и ИС

# ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

Дивакансии  $V_2^0, V_2^-, V_2^+, V_2^{--}$

Ассоциация вакансий и кислорода (А-центр)  
и фосфора (Е-центр).

Области разупорядочения (ОР или кластеры) 10-100 Ангстрем

Остаточные повреждения при временах  $t > 10^3$ с не зависят от плотности потока частиц при воздействии

При  $t = (10^{-4} - 10^3)$ с происходит быстрый отжиг с коэффициентом отжига  $AF$ , достигающим 2-3 раз и зависящим от температуры облучения, электрических нагрузок и энергии частиц.

Дефекты создают в запрещенной зоне полупроводника акцепторные и донорные уровни.

Для Si это в основном  $E_c - 0,17$  эВ  
 $E_v + 0,27$  эВ

Отжиг всех дефектов при  $T > 600$  К.

# ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

**Концентрация свободных носителей заряда – уменьшается**

Начальника скорость удаления носителей зависит от вида и энергии воздействующих частиц, Температуры облучения, совершенства кристаллов.

**Подвижность носителей заряда – снижается.**

**Зависит от температуры и вида воздействующих частиц.**

**Удельное сопротивление – растет**

**Проводимость при облучении стремится к собственной.**

**Время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  - уменьшается.**

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K\Phi$$

Кт зависит: от скорости введения радиационных центров;  
сечений захвата центров;  
уровня Ферми;  
концентрации основных носителей заряда;  
температуры облучения.

50% изменение при облучении:

- время жизни ( $10^{12} - 10^{13}$ ) н/см<sup>2</sup>
- удельное сопротивление  $\sim 7 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>
- подвижность –  $10^{16}$  н/см<sup>2</sup>

Эффекты смещения представляют собой перемещение атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке материала в междоузлия.

Эффекты переноса заряда обусловлены передачей кинетической энергии ИИ вторичным частицам и проявляются в виде неустановившихся сторонних токов.

Ионизационные эффекты проявляются в виде переходных эффектов и связаны с образованием неравновесных носителей заряда.

Максимальный уровень воздействующего фактора, при котором все критериальные параметры ИЭТ находятся в пределах допусков, называется уровнем бесбойной работы (**УБР**).

Промежуток времени в процессе и после воздействия, в течение которого хотя бы один из критериальных параметров продолжает находиться за пределами допуска, называется временем потери работоспособности (**ВПР**).

## Классификация процессов по их продолжительности и виду изменений, вызываемых ими в изделиях:

- длительные обратимые процессы (снижение коэффициента усиления биполярных транзисторов при импульсном облучении нейтронами, релаксация встроенного заряда в подзатворном окисле МОП-приборов и т.д.);
- длительные необратимые процессы (снижение нагрузочной способности активных элементов ИС, увеличение падения напряжения на открытых диодах, увеличение тока потребления КМОП ЦИС и др.);
- кратковременные обратимые процессы (протекание ионизационных токов и токов утечки в процессе и после воздействия импульсного гамма-излучения);
- кратковременные необратимые процессы (например, перегрев с выгоранием металлизации ИС, приводящий к полному отказу).

# **Обобщенная модель воздействия ИИ на параметры и свойства ИЭТ**



- **Конструирование РЭА, стойкой к ионизирующему облучению, предусматривает выбор материалов и элементной базы, а также конструктивных решений, уменьшающих влияние радиации.**
- **Радиационная стойкость изделия или материала (ГОСТ 18298—72) — свойство аппаратуры, комплектующих элементов, материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время воздействия ИИ. Критерием радиационной стойкости изделия (материала) является предельное значение определяющего параметра радиационной стойкости. Определяющий параметр — параметр изделия (материала), изменение значения которого в условиях воздействия ИИ свыше определенного значения исключает возможность его применения. Показателем радиационной стойкости изделия служит значение характеристики поля ИИ, при котором достигаются критерии радиационной стойкости.**

- **Воздействие ИИ на изделие (материал) проявляется в виде радиационного и ионизационного эффектов, обратимого или необратимого радиационных дефектов, радиационного разогрева и других явлений. Радиационный эффект — изменение значений параметров изделий и материалов в результате воздействия ИИ. Ионизационный эффект — радиационный эффект, обусловленный ионизацией и возбуждением атомов вещества. Радиационный дефект — радиационный эффект, проявляющийся в нарушении структуры вещества под воздействием ИИ. Обратимый радиационный дефект — радиационный дефект в веществе, исчезающий с прекращением облучения. Необратимый радиационный дефект — радиационный дефект, длительно сохраняющийся в веществе после прекращения облучения. Радиационный разогрев — радиационный эффект, проявляющийся в повышении температуры материала в результате поглощения энергии ИИ.**

- **Нейтронное излучение в основном является причиной радиационных дефектов, обусловленных физико-химическими преобразованиями в материалах (например, сшивание и деструкция при облучении полимеров, окисление). Возможны радиационный разогрев, выделение кислот и активных газов (хлор, фтор, водород).**
- **При  $\gamma$  - излучении преобладают ионизационные эффекты. Увеличение концентрации избыточных носителей — основная причина увеличения проводимости диэлектрических и полупроводниковых материалов**
- **Металлы наиболее устойчивы к воздействию ИИ: им свойственна высокая концентрация свободных носителей заряда, а характеристики их слабо зависят от дефектов кристаллической решетки. Последствия нейтронного облучения начинают сказываться при флюенсах порядка  $E_{20}$  нейтр./см<sup>2</sup>. Гамма - излучение на свойства металлов практически не влияет. У большинства металлов при воздействии ИИ предел текучести возрастает в 2 ... 3 раза, ударная вязкость снижается,  $\rho_e$  повышается на 10...30%. Наименьшей радиационной стойкостью обладают электротехнические стали и магнитные материалы, у которых изменяется  $\mu$ ,  $\rho_e$  при флюенсах порядка  $E_{18}$  нейтр./см<sup>2</sup>.**
- **Некоторые металлы, например, бор, марганец, кобальт, кадмий, цинк, молибден и др. после облучения тепловыми нейтронами становятся источниками и вторичного ИИ.**
- **Наименее устойчивы к воздействию ИИ полупроводниковые и органические материалы. У полупроводниковых материалов при облучении изменяются время жизни и подвижность носителей заряда, коэффициент Холла. У органических материалов — механические свойства, электрическая прочность,  $\epsilon$ ,  $\tan \delta$ .**
- **Неорганические материалы устойчивы к ИИ:  $\epsilon$ , гизол,  $\tan \delta$  у них изменяются незначительно; у стекол изменяются оптические свойства и цвет.**

## Группа А:

Доминирующий радиационный эффект - эффекты смещения, связанные с перемещением атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке конструкционных материалов в междоузлия. Этими эффектами определяется радиационная стойкость диодов различного назначения, транзисторов и ИС биполярной технологии, оптоэлектронных ИС, кварцевых резонаторов и генераторов, а также излучателей инжекционных лазеров на GaAs.

## Группа В:

Доминирующий радиационный эффект - накопление заряда в чувствительных областях ИЭТ в результате захвата первичных неравновесных носителей, образованных при ионизации материалов ИЭТ ионизирующими излучениями, различными ловушками и дефектами. К изделиям, радиационная стойкость которых определяется этими эффектами, относятся: транзисторы и ИС МОП - технологии, приборы с зарядовой связью, оптические стекла, волоконно-оптические линии связи, преобразователи частот оптические, сверхпроводниковые кабели, лазерные излучатели.

## Группа С:

Доминирующий радиационный эффект - ионизация конструкционных материалов ИЭТ, приводящая к изменению электрического режима каскадов и узлов различных устройств. Эти эффекты связаны с появлением дополнительных токов и электромагнитных полей при воздействии на изделие ИИ и ЭМИ, изменением температуры под действием ИИ и СИ, появлением механических напряжений - термомеханические эффекты под действием СЖРИ и СИ. Ионизационные эффекты характерны для случая ЯВ, когда на ИЭТ действует ИИ большой мощности. Хотя этим эффектам подвержены изделия из групп А и В, но есть изделия, чья стойкость определяется исключительно этими факторами. Это резисторы, конденсаторы, кабели, провода, дроссели и трансформаторы, электрические соединители и химические источники тока.

Взаимное влияние этих трех главных радиационных эффектов при потоках, характерных для ЯВ, практически не наблюдается.

Эффекты взаимовлияния (подавление тиристорного эффекта, радиационная тренировка) являются исключением из общего правила преобладающего влияния одного из трех эффектов.