

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР

д.ф. – м.н., проф. А.К. Гнап, Н.И. Коваленко, К.С. Клименко

Приведены теоретический анализ и экспериментальные исследования влияния термоэлектротренировки (ТЭТ) на устойчивость транзисторных структур.

Анализ данных [1,2], а также проведенные исследования по влиянию различных физико – химических и физико – технологических факторов [3,4] на радиационную стойкость (РС) твердотельной электроники позволили сформулировать задачу по излучению влияния предварительных термо – полевых воздействий на РС транзисторных и интегральных структур биполярной и МОП – технологий.

Теоретическое обоснование метода. Рассматривая влияние энергии, введенной в полупроводник, на его свойства, можно заметить, что введение энергии нагревом, освещением, облучением высокоэнергетичными  $\gamma$  - квантами, внедрение высокоэнергетичных частиц зачастую равнозначны. Возникающие при этом эффекты зависят лишь от уровня энергии, которая может быть передана в единичном акте взаимодействия с атомом, расположенном в узле или между узлами. Поэтому рассматривается влияние такого термодинамического фактора как повышение температуры (передачи тепловой энергии) на относительное число активных частиц в объеме полупроводника и, следовательно, на скорость протекания процесса способствующего повышению устойчивости структур (**п – р** перехода, транзистора или интегральной схемы) при введении энергии путем нейтронной бомбардировки или  $\gamma$  - облучением.

Влияние температуры иллюстрируется рис.1. На нем энергия  $E_A$  характеризует энергию, необходимую для протекания процесса, а заштрихованные части кривых 1,2 определяют относительное число частиц, имеющих энергию больше  $E_A$ . Энергетические уровни рассматриваемой системы  $E_{C1}$  и  $E_{C2}$  отвечают ее состояниям при температуре  $T_1, T_2$  и  $T_1 > T_2$  (рис.1). При температуре  $T_1$  и энергетическом уровне системы  $E_{C1}$  энер-

© д.ф. – м.н., проф. А.К. Гнап, Н.И. Коваленко, К.С. Клименко, 1998

гия, необходимая для протекания процесса повышения устойчивости изделия твердотельной электроники, равна  $E_1$ . При этом распределение частиц по энергиям характеризуется кривой (рис.1а).

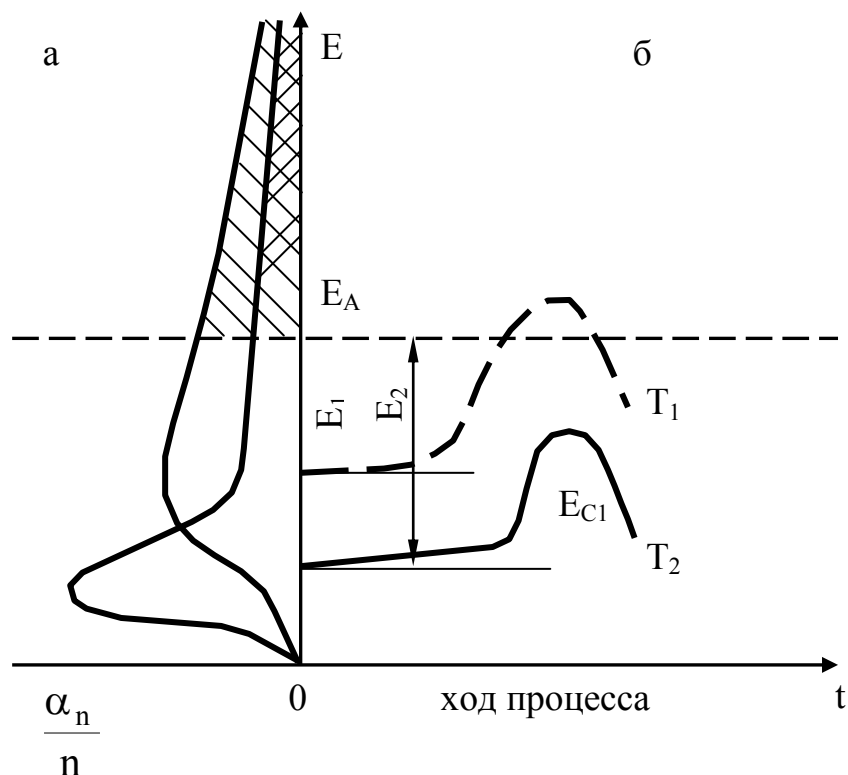


Рисунок 1 – Влияние температуры на концентрацию частиц

Повышение температуры до  $T_2$  и, следовательно, увеличение энергетического уровня системы до  $E_{C2}$ , приводит к тому, что энергетический барьер процесса уменьшается от  $E_1$  до  $E_2$ . Распределение частиц системы по энергиям характеризуется кривой (2), которая свидетельствует об увеличении числа частиц с большой энергией.

Известно, что экспоненциальная зависимость доли частиц, обладающих энергией не меньше некоторой заданной величины от величины энергии и от температуры универсальна. А скорость протекания физических процессов пропорциональна относительному числу активных частиц

$$V = C \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right),$$

где  $E_A$  – энергия активации;  $C$  – коэффициент.

Величина  $E_A$  и  $C$  определяются механизмом протекающего процесса.

Скорость процесса резко увеличивается с повышением температуры в соответствии с повышением доли части с большими энергиями.

Общим механизмом поглощения тепловой энергии при нагревании твердых тел является увеличение энергии колебаний атомов. Значение имеет также флуктуация энергии колебаний атомов. Вероятность того, что в результате флуктуации энергия колебаний атома станет равной или выше энергии активации данного процесса  $E_A$ , определяется уравнением

$$P(E_A) = 2 \sqrt{\frac{E_A}{\pi kT}} \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right).$$

Из данной формулы следует, что чем больше энергия активации  $E_A$ , тем меньше относительное число активных частиц и наоборот, чем ниже энергия активации, тем больше относительное число активных частиц и выше скорость протекания процессов.

Известно, что процессы дефектообразования в полупроводниках при бомбардировке высокоэнергетичными частицами идут легче. В местах, где сосредоточены точечные и линейные дефекты, наблюдаются механически напряженные области, скопления примеси и дефектов [3]. Можно также считать, что процессы перемещения элементарных точечных и линейных дефектов в полупроводниках связаны с изменением концентрации и количества вещества в результате переноса частиц вещества и их взаимодействия. Это значит, что скорости протекания этих процессов представляют собой скорости изменения концентрации вещества (или дефектов). Можно предположить, что введение тепловой энергии в изделие твердотельной электроники будет активировать процессы смещения (отжига) дефектов (точечных и более сложных), способствовать формированию нейтральных областей (в отношении механических напряжений) и объединению точечных и линейных дефектов, смягчению профилей легирования (диффузионных фронтов), т.е. будет приближать систему к положению равновесия, так как практически для всех систем закономерно стремление занять наиболее энергетически выгодное положение (с минимальным уровнем избыточной энергии). Возможность такого процесса представляется очевидным, так как вышеназванные микронеоднородности обладают уровнями энергии выше, чем остальные области матричного полупроводника.

Сведения об изменении радиационной стойкости (РС) кремниевых структур после предварительного комбинированного воздействия на них температуры и электрического поля в литературе отсутствовали, поэтому нами были проведены исследования РС кремниевых планарных транзисторных, интегральных биполярных и МДП структур до и после термоэлектротренировки (ТЭТ).

Термо – полевые воздействия и РС планарных транзисторных структур. Транзисторные планарные структуры разделялись на три партии, из которых одна подвергалась термическому нагреву при  $T = 125^{\circ}\text{C}$ , вторая –

нагреву при  $T = 125^{\circ}\text{C}$  и одновременному электрическому воздействию с мощностью рассеивания на коллекторе 50 мВт ( $I_{\text{Э}} = 2\text{mA}$ ,  $U_{\text{С}} = 25\text{В}$ ), третья партия являлась контрольной. Затем структуры облучались быстрыми нейтронами. Электрические параметры структур измерялись до и после термических и термо – полевых воздействий, а также после высокоэнергетического облучения. Ниже приведены результаты измерений для двух из наиболее чувствительных параметров структур: коэффициента усиления по току  $h_{21\text{E}}$  и постоянной времени цепи коллектора  $R_{\text{В'В}}C_{\text{С}}$ , где  $R_{\text{В'В}}$  – сопротивление базы;  $C_{\text{С}}$  – емкость коллектора.

На рис.2 и 3 показано, что изменение  $h_{21\text{E}}$  и  $R_{\text{В'В}}C_{\text{С}}$  при облучении

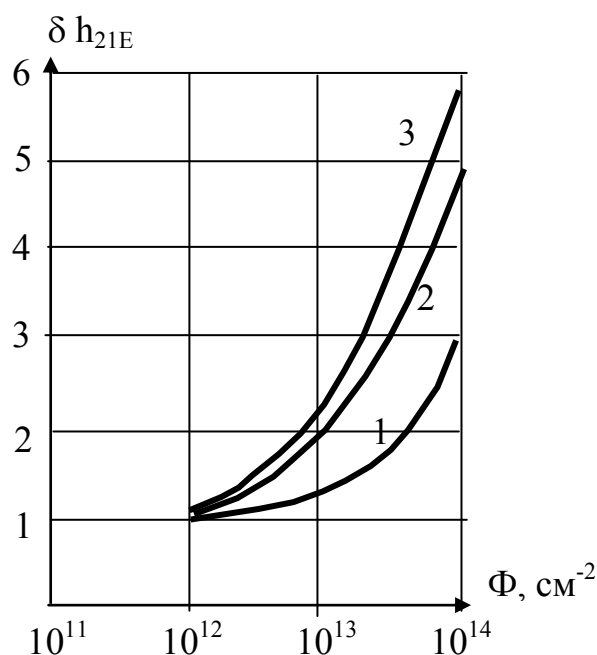


Рисунок 2 – относительное изменение коэффициент усиления по току кремниевых транзисторных структур при изменении флюэнса быстрых нейтронов: 1 – ТЭТ:  $t = 500$  часов,  $T = +125^{\circ}\text{C}$ ; 2 – термообработка:  $t = 500$  часов,  $T = +125^{\circ}\text{C}$ ; 3 – контрольная партия.

нейтронами зависят от предварительной обработки структур. Чисто температурная обработка структур (кривые 2) влияет на их радиационную стойкость сравнительно слабо. Относительные изменения параметра  $h_{21\text{E}}$  и  $R_{\text{В'В}}C_{\text{С}}$  при флюэнсах нейтронов  $5 \cdot 10^{13} \text{см}^{-2}$  и  $10^{14} \text{см}^{-2}$  отличаются примерно на 5 – 10%. Однако, повышение РС термообработанных структур при  $\Phi \geq 10^{13} \text{см}^{-2}$  отмечается совершенно четко.

Существенное повышение РС наблюдается у структур, подвергнутых термоэлектрическому воздействию. Изменение  $h_{21E}$  до  $\Phi \leq 10^{12} \text{ см}^{-2}$  было незначительным (в пределах погрешности измерения). Начиная с флюэнса  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  разница в изменение  $h_{21E}$  тренированных и нетренированных структур достигла более 1,5 раз, а при  $\Phi \geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$  – более чем в 2 раза (рис.2).

Аналогичные по характеру зависимости наблюдались и для параметра  $R_{В'В}C_C$ . Изменение параметра с увеличением флюэнса нейтронов более резко. Однако, относительное изменение его для термоэлектротренированных и контрольных структур несколько меньше, чем для  $h_{21E}$  и составляет  $\cong 1,25$  раза для  $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и 1,5 для  $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

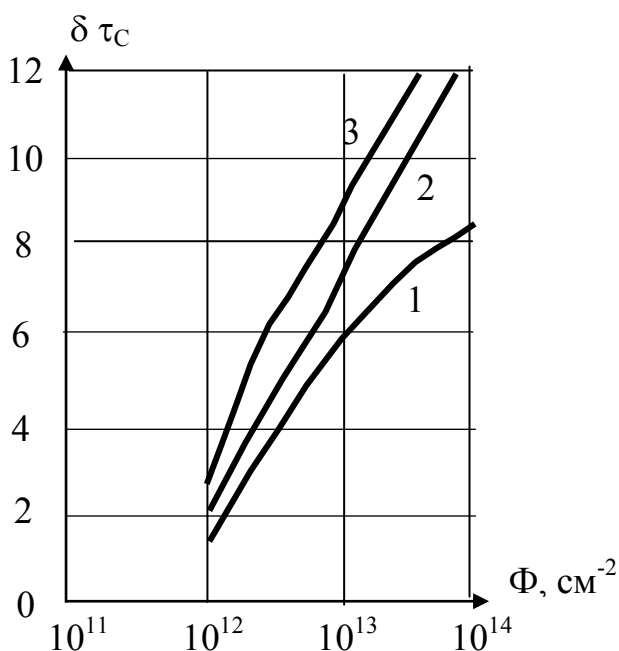


Рисунок 3 – относительное изменение постоянной времени цепи коллекторов транзисторных структур при изменении флюэнса быстрых нейтронов: 1 – ТЭТ:  $t = 500$  часов,  $T = +125^{\circ}\text{C}$ ; 2 – термообработка:  $t = 500$  часов,  $T = +125^{\circ}\text{C}$ ; 3 – контрольная партия.

Полученные результаты говорят об изменении условий вторичного радиационного дефектообразования в результате предварительной термической и термо – полевой обработки транзисторных структур. Причем, во втором случае эти изменения выражены значительно сильнее.

Электронно – дырочные переходы, образующиеся при диффузии имеют конфигурацию, отличающуюся от идеальной. Неравномерный характер, образующегося перехода, обусловлен неравномерной диффузией



вглубь проводника при формировании распределений акцепторной и донорной примесей.

При травлении транзисторных структур со стороны коллекторного перехода наблюдается повышенная плотность дислокации ( $N = 10^6 \text{ см}^{-2}$ ) вблизи поверхности диффузии. Плотность ямок травления в предпереходной области достигает  $N = 10^7 \text{ см}^{-2}$ .

Наряду с дислокациями, вдоль которых наблюдается ускоренная диффузия примеси (рис. 4а) наблюдаются полосы скольжения (рис. 4б). Они выявляются в области электронно – дырочных переходов химическим окрашивающим травлением, и характеризует распределение остаточных механических напряжения в области перехода.

Механическая шлифовка и полировка кремния с последующей химической полировкой и окрашиванием позволили выявить со стороны противоположной поверхности диффузии картины, показанные на рис.5.

При последующей химической полировке (рис.4 в, г) дислокации выявляются не по всей области электронно – дырочного перехода, а только в некоторых местах. Это вызвано неоднородностями диффузии примеси. Наблюдается размытие линий **n – p** перехода, что можно объяснить ускоренной диффузией легирующей примеси по дислокациям.

Так как атомный радиус примесных атомов бора и фосфора отличается от атомного радиуса кремния, то после замещения атомов кремния легирующей примесью происходит изменение параметров кристаллической решетки. Этот эффект сопровождается образованием дислокаций, вследствие несоответствия кристаллических решеток в плоскости диффузии. Минимальное значение общей диффузионной концентрации, необходимое для возникновения в диффузионной области, достаточного для образования дислокации, равно  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В диффузионной области могут образовываться не только единичные дислокации, но и два вида дислокационных сеток. Один вид, состоящий из краевых и винтовых компонентов, образует концентрические дислокационные петли, которые наклонены к поверхности и снимают напряжения, обусловленные диффузией. Другой вид дислокационных сеток только частично снимает механические напряжения (сетки из мелких точек на рис. 5).

Время жизни неосновных носителей, рекомбинация, тип проводимости, подвижность неосновных носителей зависят от концентрации дислокаций, в связи с чем они оказывают зачастую определяющее влияние на характеристики полупроводниковых приборов.

Повышение концентрации дислокации ведет к появлению лавинного пробоя в области пространственного заряда электронно - дырочного перехода. Пробой вызывается изменением в распределении пространственного заряда, так как при этом создается локальное усиление поля, способ-

ствующего образованию лавинного пробоя. Характеристики **p – n** переходов при этом ухудшаются.

Обладая акцепторными свойствами дислокация может служить каналом для движения неосновных носителей в области перехода. Дислокации в **n – p** переходе увеличивают ток насыщения, уменьшают накопление введенных в **p – n** переход носителей. С увеличением плотности дислокаций, обратный ток **p – n** перехода растет. Коэффициент усиления по току у транзисторов с повышенной плотностью дислокаций ниже, чем в структурах с малой плотностью дислокаций.

Выход из строя элемента твердотельной электроники происходит не вследствие увеличения средней концентрации дефектов, а в результате их увеличения в ослабленной области. Обычно в такой области наблюдается повышенная плотность дислокаций, трещин и других микронеоднородностей по сравнению с другими областями.

Следовательно, что если количество микро дефектов в единичном объеме превышает критическое, а так же, если градиент электрического поля в микрообластях превышает критическую величину, то наблюдающееся неустойчивое равновесие при облучении высокоэнергетичными частицами будет изменяться и приводить к выходу из строя изделия электронной техники. Термоэлектротренировка ведет к некоторому выравниванию концентрации электрически активных центров в области электронно – дырочного перехода за счет процесса диффузии и электродиффузии. Распределение электрического поля в области электронно – дырочного перехода изменяется таким образом, что уменьшаются градиенты электрических полей в критических точках. Это приводит к повышению устойчивости изделий РЭА при высокоэнергетичном облучении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. - М.: Атомиздат, 1969. – 311с.
2. Томпсон Н. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. - М.: Мир, 1971. – 368с.
3. Гнап А.К., Куринный В.А., Лисогор С.К. Повышение радиационной устойчивости РЭА термоэлектротренировкой микросхем и полупроводниковых приборов. Труды IV межвузовской конференции по ЭРДУ средней мощности. – Харьков: ХАИ, 1978. – С. 649.
4. Шалаев А.М. Радиационно – стимулированная диффузия в металлах. – М.: Атомиздат, 1975. – 147с.