

Д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ, к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ

Украина, Одесский гос. политехнический ун-т,
Одесская гос. морская академия
E-mail: vadim@vag.intas.odessa.ua

По материалам доклада на МНПК
«Современные информационные
и электронные технологии»
(«СИЭТ-2000»). —
23–26 мая 2000 г., Одесса

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Показана возможность управления параметрами микроэлектронных изделий с помощью радиационной обработки быстрыми электронами и нейтронами.

В последние годы все больше внимания уделяется изучению влияния радиационных воздействий на характеристики изделий микроэлектроники, используемых в составе разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры. Такие исследования проведены и обобщены для многих микроэлектронных изделий массового применения — для повышения стабильности операционных усилителей, для увеличения быстродействия логических ИМС высокой степени интеграции. Характер же поведения под действием радиации изделий, имеющих относительно малое применение в РЭА, но относящихся к изделиям повышенной надежности, остается, как правило, неизученным.

В данной работе выполнено исследование влияния радиационной обработки быстрыми электронами и быстрыми нейтронами на микроэлектронные изделия, имеющие частное применение в РЭА.

Объектами исследования являлись *полупроводниковые микросхемы*, применяемые в качестве первичных преобразователей температуры, со структурой, подобной описанной в [1], в которых содержались резистор, транзистор (тестовые структуры) и пять последовательно соединенных диодов (датчики температуры) на основе диффузионных слоев, составляющих структуру биполярного транзистора; *гибридные микросборки*, применяемые для измерения и стабилизации температуры первичных преобразователей неэлектрических величин.

Пассивная часть микросборок выполнена по тонкопленочной технологии и содержит 15 тонкопленочных резисторов, 4 бескорпусных интегральных микросхемы В140УД12, две микросхемы 765КТЗ-1, стабилитрон 2С164М-1 и транзистор 2Т378Б1-2 в металлокерамическом корпусе типоразмера 1211 (157.29-2).

Источником быстрых электронов с энергией 3,5 МэВ был линейный ускоритель «Электроника» ЭЛУ-4. Интегральный поток электронов рассчитывали по формуле [1]

$$\Phi = 6,2 \cdot 10^{12} I_3 t, \quad (1)$$

где I_3 — ток пучка быстрых электронов, мкА;

t — время обработки, с.

Режим обработки выбирали с учетом ограничения нагрева образцов до температур, не превышающих 60°C.

Источником быстрых нейтронов с энергией 14,5 МэВ служил генератор нейтронов типа НГ-150. Поток нейтронов измерялся методом активации фольги — диска из высокочистой меди (99,9%) толщиной 0,25 мм и диаметром 10–25 мм. Время облучения — 1 мин, выдержка образцов после облучения — 1 мин. Гамма-активность радионуклида ^{62}Cu измеряли сцинтиляционным детектором с кристаллом Na J(Fe) диаметром 75 мм на расстоянии 30 мм от центра. Медный диск помещался между двумя пластинками из полистирола толщиной 9,5 мм и диаметром 30–45 мм. В качестве анализирующей аппаратуры использовался многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024.

Расчет величины интегрального потока нейтронов производился по формуле [1]

$$\Phi_0 = S_p / (E a q p), \quad (2)$$

где S_p — площадь фотопика;

E — эффективность регистрации для геометрии «источник-детектор»;

a — поправка на поглощение в полистироле и кожухе детектора;

q — выход гамма-квантов на акт распада изотопа ^{62}Cu ;

p — экспериментальная эффективность фотопика.

Для определения температурного коэффициента напряжения (ТКН) кремниевых диодов, применяемых в качестве датчиков температуры, использовали стенд, в состав которого входили источник стабилизированного тока, измеритель тока В7-21, вольтметр В7-34А и термостат. Измерения проводили при температурах 0 и 50°C и прямом токе через диод, равном 100 мкА. Точность измерения напряжения составляла около 5%. Измерение сопротивления резистора на основе диффузионного базового слоя проводили при постоянной температуре вольтметром В7-34А. Точность измерения сопротивления составляла ~3%. Коэффициент передачи тока базы биполярного планарного транзистора измеряли с помощью измерителя параметров транзисторов Л2-48.

Исследуемые *полупроводниковые интегральные схемы частного применения* представляют собой первичные преобразователи температуры в виде диодов и в качестве термочувствительного параметра используют прямое падение напряже-

ния на $p-n$ -переходе, которое может быть представлено выражением [1]

$$U_D = 2\phi_T \ln \frac{I}{I_{нас}} + \frac{IW_p}{SeC} + \frac{W_p^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau_{nB}} + \frac{(C_n + C_p)\tau_{nu}^2}{e^2(\mu_n + \mu_p)} \left(\frac{I}{S}\right)^2, \quad (3)$$

где

- $\phi_T = \frac{kT}{e}$ – температурный потенциал;
 e – заряд электрона;
 I – ток диода;
 $I_{нас}$ – ток насыщения;
 W_p – длина p -базы;
 S – площадь $p-n$ -перехода;
 c – постоянная электронно-дырочного рассеяния, равная $\sim 1 \cdot 10^{20}$ (В·с·см) $^{-1}$;
 μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно;
 t_{nB} – время жизни электронов в базе;
 C_n, C_p – коэффициенты ударной рекомбинации, равные, соответственно: $C_n \cong 6 \cdot 10^{-31}$ см 6 /с, $C_p \cong 3 \cdot 10^{-31}$ см 6 /с.

Первый член в уравнении (3) выражает падение напряжения на $p-n$ -переходе в области пространственного заряда, а последующие члены соответствуют падению напряжения на сопротивлении базы за счет электронно-дырочного рассеяния (2-й член), рекомбинации через глубокие уровни (3-й член) и Оже-рекомбинации (4-й член).

Как известно, зависимость электрофизических параметров полупроводника от температуры определяет температурную зависимость падения напряжения на диоде. Анализ выражения (3) показывает, что с увеличением температуры 1-й и 2-й члены уменьшаются, а 3-й и 4-й, как правило, возрастают. Учитывая, что при малых токах основной вклад в падение напряжения на диоде вносит первый член выражения (3), падение напряжения на $p-n$ -переходе можно представить выражением [3, с. 205]

$$U_D \approx \frac{kT}{e} \ln \frac{IW_p p_p}{C_1 T^{4-\alpha}} + \frac{E_g}{e}, \quad (4)$$

- где p_p – концентрация дырок в p -области;
 C_1 – постоянная, не зависящая от температуры;
 $\alpha \cong 2,5$;
 E_g – ширина запрещенной зоны.

В качестве датчика температуры $p-n$ -переход работает в режиме $I = \text{const}$. Для уменьшения энергопотребления используется режим токов [1]

$$I < C_1 T^{4-\alpha} / (W_p p_p), \quad (5)$$

когда логарифм отрицателен. Поэтому с ростом температуры напряжение на кремниевом $p-n$ -переходе уменьшается.

Действительно, как показали проведенные ранее исследования [1], средний температурный коэффициент напряжения матрицы из 5 диодов составил $\text{TKH}_M \approx -10,56$ мВ/°С. На один $p-n$ -переход это

составляет $\text{TKH}_d \approx -2,1$ мВ/°С, что близко к известным численным значениям TKH кремниевых диодов [2, с. 81; 3, с. 205].

Радиационная обработка датчиков температуры быстрыми электронами дозами 10^{15} и 10^{16} см $^{-2}$ приводит к уменьшению прямого падения напряжения на диодах и увеличению температурного коэффициента напряжения. При этом среднее значение TKH на один $p-n$ -переход составляет $-2,3$ и $-2,6$ мВ/°С для доз 10^{15} и 10^{16} см $^{-2}$, соответственно.

Уменьшение прямого падения напряжения на диодах после радиационной обработки можно объяснить изменением электрофизических параметров кремния. Так, общепризнано [2, с. 419; 3, с. 76], что воздействие радиации приводит к уменьшению подвижности основных и неосновных носителей заряда (μ_n и μ_p), уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда (τ_{nB}) и уменьшению концентрации основных носителей заряда (p_p). Косвенным подтверждением происшедших изменений электрофизических параметров кремния является наблюдающееся увеличение сопротивления базового слоя и уменьшение коэффициента передачи тока базы транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, которые проявляются тем больше, чем больше доза радиационного облучения.

Эти изменения электрофизических свойств кремния проявляются в изменении величины прямого падения напряжения на $p-n$ -переходе за счет увеличения тока насыщения и уменьшения, соответственно, первого члена выражения (3), которым при малых токах диода в основном и определяется величина прямого падения напряжения. Уменьшение длины p -базы вследствие уменьшения концентрации основных носителей заряда и расширения при этом области объемного заряда $p-n$ -перехода может приводить к уменьшению второго и третьего членов выражения (3). Четвертый член этого выражения также уменьшается, т. к. зависит от времени жизни неосновных носителей заряда.

Уменьшением третьего и четвертого членов выражения (3) и может быть объяснено увеличение температурного коэффициента напряжения, поскольку при увеличении температуры значения этих членов достигают величин, меньших по сравнению с этими величинами для необлученных образцов.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что радиационная обработка быстрыми электронами интегральных датчиков температуры приводит к повышению модуля температурного коэффициента напряжения, а следовательно, и к повышению их чувствительности.

Радиационная обработка быстрыми электронами, приводящая к повышению TKH , заключается в облучении датчиков температуры на линейном ускорителе электронов при следующих параметрах:

- энергия электронов – 3,5 МэВ;
- ток пучка – 0,2 мА;
- время облучения: доза 10^{15} см $^{-2}$ – 13 мин; доза 10^{16} см $^{-2}$ – 134 мин.

Электрические параметры микросборок после радиационной обработки
(в скобках — до радиационной обработки)

Виды радиационной обработки	Доза, см ⁻²	U _{ст} , В	U _{вых0} , мВ	U _{вх} , мВ	U _{вых} , В	I _{вкл} , мА	I _{выкл} , нА
Быстрые электроны	10 ¹⁷	13,30 (11,6)	5,3 (9,8)	501 (500)	4,40 (4,46)	25,70 (26,99)	3,0 (16)
	10 ¹⁶	13,75 (11,7)	0,2 (0,3)	500 (496)	4,50 (4,51)	25,21 (27,00)	3,2 (13)
	10 ¹⁵	11,50 (11,2)	3,12 (—)	500 (—)	4,49 (—)	24,71 (—)	7,7 (—)
	10 ¹⁴	11,21 (11,1)	4,5 (9,1)	500 (501)	4,52 (4,53)	24,40 (27,06)	7,5 (14)
Быстрые нейтроны	10 ¹⁶	11,90 (11,7)	0,5 (3,1)	500 (500)	4,70 (4,47)	23,50 (26,98)	5,0 (14)
	10 ¹⁵	11,32 (11,3)	5,9 (2,4)	500 (499)	+4,60 (4,54)	23,75 (26,92)	7,0 (20)
	10 ¹⁴	11,32 (11,2)	4,2 (2,6)	501 (500)	+4,53 (4,47)	23,47 (26,89)	11,0 (25)

В проведенных экспериментах включение в технологический процесс изготовления интегральных микросхем указанной радиационной обработки позволило увеличить температурный коэффициент напряжения и, соответственно, термочувствительность интегральных датчиков температуры на 10–20%. Временная стабильность улучшенных параметров: при наработке 10 тыс. часов отклонения не превышали ±1%.

Влияние быстрых электронов и нейтронов на гибридные микросборки исследовано при радиационной обработке быстрыми электронами дозами 10¹⁴, 10¹⁵, 10¹⁶, 10¹⁷ см⁻², быстрыми нейтронами — дозами 10¹⁴, 10¹⁵, 10¹⁶ см⁻².

Результаты исследований представлены в **таблице**, где U_{ст} — выходное стабилизированное напряжение; U_{вых0} — выходное напряжение дифференциального усилителя при U_{вх}=0; U_{вх} — входное напряжение; U_{вых} — выходное напряжение при U_{вх}=500±10 мВ; I_{вкл} — ток выходного транзистора во включенном состоянии; I_{выкл} — ток входного транзистора в выключенном состоянии.

Анализ полученных данных показал, что электрические параметры изменялись в допустимых пределах. Исключение составляла обработка быстрыми электронами дозами 10¹⁶ и 10¹⁷ см⁻². В этих случаях выходное стабилизированное напряжение превышало допустимое значение приблизительно на 1,5 В. Радиационная стойкость исследованных микросборок к быстрым нейтронам оказалась более высокой (10¹⁶ см⁻²) по сравнению с их стойкостью к быстрым электронам.

Наибольшие изменения наблюдаются для токов включения и выключения выходного и входного транзисторов, что может быть объяснено уменьшением коэффициента передачи тока базы. Следует отметить, что наблюдаемое уменьшение токов транзисторов не выходит за рамки допустимых значений и имеет положительный эффект.

Различие радиационной стойкости микросборок при облучении быстрыми электронами и быстрыми нейтронами объясняется тем, что обработка быстрыми электронами сопровождается дополнительным воздействующим фактором — нагревом изделия, обусловленным торможением электронов в стальном корпусе микросборки.

Как следует из полученных результатов, в исследованных микросборках проведенным радиационным облучением могут быть снижены ток выходного транзистора во включенном состоянии I_{вкл} и ток входного транзистора в выключенном состоянии I_{выкл} при сохранении высокой радиационной стойкости входящих в их состав операционных усилителей и тонкопленочных резисторов, что, по нашим данным, повышает долговечность транзисторов микросборок в 2–5 раз. То есть включение в технологический процесс изготовления микросборок этапа обработки быстрыми электронами и быстрыми нейтронами дозами, не превышающими пороговые, приводит к снижению энергопотребления и I_{вкл} и I_{выкл}, а также к повышению срока службы изделий.

Радиационная обработка быстрыми электронами полупроводниковых микросхем, используемых в качестве первичных преобразователей температуры, позволяет повысить температурный коэффициент напряжения первичных преобразователей на 10–20 %.

При оптимальном радиационном воздействии быстрыми электронами и быстрыми нейтронами на гибридные микросборки, предназначенные для измерения и стабилизации температуры первичных преобразователей неэлектрических величин, улучшается качество микросборок, повышается их долговечность и снижается энергопотребление.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Завадский В. А., Масенко Б. П. Влияние облучения на параметры кремниевых элементов / В сб.: Молодежь третьего тысячелетия: гуманитарные проблемы и пути их решения. Сер. Экономика, моделирование технических и общественных процессов, информатология, экология. — Т. 3. — Одесса: ОГПУ, 2000. — С. 236–241.
2. Тугов Н. М., Глебов З. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1990.