

УДК 621.382.82

**А.И. Лыков**, инженер,  
**В.С. Сینیцын**, инженер,  
 Воен. ин-т телекоммуникаций и информати-  
 зации, г. Киев,  
**А.А. Савельев**, канд. техн. наук, доц., Одес.  
 нац. политехн. ун-т

## РАДИАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*О.І. Лыков, В.С. Сініцын, А.О. Савельєв,*  
**Радіаційне керування властивостями первинних перетворювачів температури.** Досліджено можливість керування властивостями первинних перетворювачів температури за допомогою опроміювання швидкими електронами. У роли датчиків температури використовували діоди в структурі напівпровідникової мікросхеми.

*A.I. Lykov, V.S. Sinitsin, A.A. Savelyev.*  
**Radiation controlling the properties of primary temperature converters.** The possibility of controlling the properties of primary temperature converters with the help of fast electrons irradiation was investigated. Diodes were used as temperature sensors in the semiconductor microcircuit structure.

Стремительное развитие электронной техники обуславливает потребность в соответствующих материалах, важнейшими из которых являются полупроводники. Поэтому поиск новых материалов и получение традиционных, но с новыми свойствами, остается актуальной задачей. Контролируемая радиационная обработка материалов и изделий электронной техники уже зачастую показывает свою состоятельность в решении этой задачи. Но сложность интерпретации механизмов воздействия радиации даже на однородные однокомпонентные кристаллические материалы, а тем более на материалы, не являющиеся таковыми, и на изделия электронной техники, требует активного расширения экспериментальных исследований в этой области.

В данной работе исследовались полупроводниковые микросхемы, применяемые в качестве первичных преобразователей температуры. Микросхема содержит резистор, биполярный транзистор и пять последовательно соединенных диодов.

Резистором служит базовый слой, а в качестве диодов — эмитерные переходы транзисторных структур. Резистор и основной транзистор выполняют функции тестовых структур, а пять диодов — датчика температуры. Термочувствительным параметром является прямое падение напряжения на *p-n*-переходе. Для диода с *p*-базой предлагается следующее выражение:

$$U_d = 2\lambda_T \ln I \frac{I}{I_{нас}} + \frac{I}{S} \cdot \frac{W_p}{qc} + \frac{W_p^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau_{nB}} + \frac{(C_n + C_p)\tau_{nB}^2}{q^2(\mu_n + \mu_p)} \left(\frac{I}{S}\right)^2, \quad (1)$$

где  $\lambda_T = \frac{kT}{q}$  — температурный потенциал;

$I$  — ток диода;

$I_{нас}$  — ток насыщения;

$S$  — площадь *p-n*-перехода;

$q$  — заряд электрона;

$c = 1 \cdot 10^{20}$  (В с см)<sup>-1</sup> — постоянная электронно-дырочного рассеяния;

$C_n = 6 \cdot 10^{-31}$  см<sup>6</sup>/с,  $C_p = 3 \cdot 10^{-31}$  см<sup>6</sup>/с — коэффициенты ударной рекомбинации;

$\mu_n, \mu_p$  — подвижность электронов и дырок, соответственно;

$\tau_{nB}$  — время жизни электронов в базе.

В уравнении первый член выражает падение напряжения на области пространственного заряда *p-n*-перехода, а последующие члены отражают падение напряжения на сопротивлении базы за счет электронно-дырочного рассеяния (второй член), рекомбинации через глубокие уровни (третий член) и Оже-рекомбинации (четвертый член).

Температурная зависимость падения напряжения на диоде обусловлена зависимостью электрофизических параметров полупроводника от температуры. Анализ (1) показывает, что с увеличением температуры первый и второй члены уменьшаются, а третий и четвертый члены, как правило, возрастают. Учитывая, что при малых токах основной вклад в падение напряжения на диоде дает первый член выражения (1), падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе можно представить выражением

$$U_d \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{IW_p p_p}{C_1 T^{4-\alpha}} + \frac{E_g}{q}, \quad (2)$$

где  $W_p$  — длина  $p$ -базы;

$C_1$  — постоянная, не зависящая от температуры;

$p_p$  — концентрация дырок в  $p$ -области;

$\alpha=2,5$ ;

$E_g$  — ширина запрещенной зоны.

При работе в качестве датчика температуры  $p$ - $n$ -переход работает в режиме  $I=\text{const}$ .

Для уменьшения энергопотребления используется режим токов  $I < \frac{C_1 T^{4-\alpha}}{IW_p p_p}$ , когда логарифм в

(2) отрицателен. Поэтому с ростом температуры напряжение на кремниевом  $p$ - $n$ -переходе уменьшается.

Действительно, как показали проведенные исследования, средний температурный коэффициент напряжения матрицы ТКУ<sub>М</sub> из пяти диодов составил 10,56 мВ/°С.

В пересчете на один  $p$ - $n$ -переход это составляет 2,1 мВ/°С, что близко к известным численным значениям ТКУ кремниевых диодов.

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

Уменьшение прямого падения напряжения на диодах после радиационной обработки можно объяснить изменением электрофизических параметров кремния. Воздействие радиации приводит к уменьшению подвижности основных  $\mu_p$  и неосновных носителей заряда  $\mu_n$ , уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_{nB}$ , уменьшению концентрации основных носителей заряда  $p_p$ . Косвенным подтверждением изменений электрофизических параметров кремния является увеличение сопротивления базового слоя и уменьшение коэффициента передачи тока базы транзистора, включенного по схеме с общей базой. Это проявляется тем в большей степени, чем больше доза радиационного облучения.

Изменения электрофизических свойств кремния проявляются в изменении величины прямого падения напряжения на  $p$ - $n$ -переходе за счет увеличения тока насыщения  $I_{\text{нас}}$

$$I_{\text{нас}} \cong qn_p \sqrt{\frac{D_n}{\tau_{nB}}},$$

а следовательно, уменьшения первого члена в (1). При малых токах диода он, в основном, определяет величину прямого падения напряжения. Уменьшение длины  $p$ -базы за счет уменьшения концентрации основных носителей заряда и расширения при этом области объемного заряда  $p$ - $n$ -перехода может приводить к уменьшению второго и третьего члена выражения. Четвертый член этого выражения также уменьшается, так как зависит от времени жизни неосновных носителей заряда.

Увеличение температурного коэффициента напряжения можно объяснить уменьшением третьего и четвертого членов выражения (1), поскольку при увеличении температуры значения этих членов после облучения будут меньше, чем для необлученных образцов.

Проведенные исследования показывают, что радиационная обработка быстрыми электронами позволяет управлять основными параметрами интегральных датчиков температуры. Она повышает модуль температурного коэффициента напряжения, а следовательно, увеличивает температурную чувствительность.