

## Температурная зависимость скорости развития отказов, обусловленных усталостными явлениями в металлизации СВЧ транзисторов

**Гришаков М. Н., Синкевич В. Ф., Таран П. В.**

В работах [1-3] показано, что при работе в импульсных периодических режимах основным механизмом отказов СВЧ транзисторов является усталостная деградация многослойной металлизации и окисла. Действительно, для таких режимов характерны существенные колебания (термоциклы) температуры  $\Delta T \approx 90-130^\circ\text{C}$  структуры прибора. Количество таких колебаний  $N_{\text{ц}}$  за время работы транзистора при периоде  $\approx 1\text{нс}$  составляет  $10^{10}-10^{12}$  циклов. Переменные во времени и неоднородные тепловые поля вызывают циклические механические напряжения вследствие различия температурных коэффициентов расширения слоёв материалов, расположенных на поверхности Si кристалла: кремний, многослойная металлизация, окисел [4]. Представляет большой практический интерес оценить зависимость времени наработки до отказов  $t_{\text{н}}$  и, соответственно, числа термоциклов  $N_{\text{кр}}$ , при достижении которых наступает отказ от величины амплитуды  $\Delta T$  термоцикла и величины абсолютного значения температуры металлизации транзистора  $T$ . При этом под значением  $T$  в импульсном периодическом режиме можно понимать среднее значение температуры, относительно которого происходят температурные колебания от значения  $T_{\text{max}}$  в конце импульса до значения  $T_{\text{min}}$  в конце паузы.

В работе [5] дана оценка амплитуды напряжения, возникающего в плёнке:

$$\Delta\delta = \Delta T(\alpha_f - \alpha_s) \cdot Em, \quad (1)$$

где  $\alpha_f$ ,  $\alpha_s$  - средние коэффициенты расширения для плёнки и подложки;  $Em$  - модуль упругости плёнки.

Если считать, что амплитуда изменения температуры на поверхности кристалла  $\Delta T$  составляет  $100^\circ\text{C}$ , то напряжение  $\Delta\delta$  имеет порядок  $10^8\text{Н/м}^2$ . Эта величина близка к статическому пределу текучести  $\delta_r$  для Al. Циклические изменения напряжения с амплитудой  $\delta_r$  приводят к нарушению адгезии на границе раздела металл-полупроводник и металл-окисел и последующему разрушению металлизации.

Чтобы оценить продолжительность работы транзисторной структуры до отказа  $t_{\text{н}}$  и критическое число циклов  $N_{\text{кр}}$  вследствие термоциклирования, можно использовать соотношение [6]:

$$t_{\text{н}} = N_{\text{кр}} \cdot t_0 = A \cdot \exp[u(\Delta\delta)/kT], \quad (2)$$

где  $u(\Delta\delta)$  - энергия активации процесса усталостного разрушения металлизации ( $u(\Delta\delta) = -U_0 (\ln \Delta\delta/\delta_0)$ ),  $t_0$  - период следования импульсов в периодическом СВЧ режиме.

Тогда с учётом (1) получаем следующее выражение для времени наработки до отказа:

$$t_H = Nkp \cdot t_0 = A \cdot \left[ \frac{\Delta T (\alpha_f - \alpha_s) \cdot E_m}{\delta_0} \right]^{-\frac{U_0}{kT}} \quad (3)$$

Из полученной формулы следует (см. рис. 1), что время наработки до отказа  $t_H$  и, соответственно,  $Nkp$  резко уменьшается при увеличении  $\Delta T$ . Общий уровень температуры  $T$  влияет на зависимость времени до отказа в соответствии с формулой Аррениуса. Однако характер этой зависимости не соответствует эксперименту. Результаты длительных испытаний модулей подтверждают резкую зависимость скорости деградации металлизации СВЧ транзисторов от амплитуды термоциклирования, а также уменьшение  $Nkp$  с ростом  $T$ . Из результатов испытаний также следует, что режим длинных импульсов приводит к более быстрой деградации структуры транзистора, чем режим с минимальной длительностью импульсов. Необходимо провести дальнейшие исследования с целью уточнения зависимости  $t_H$ ,  $Nkp$  от  $\Delta T$ ,  $T$  и длительности импульса СВЧ мощности.

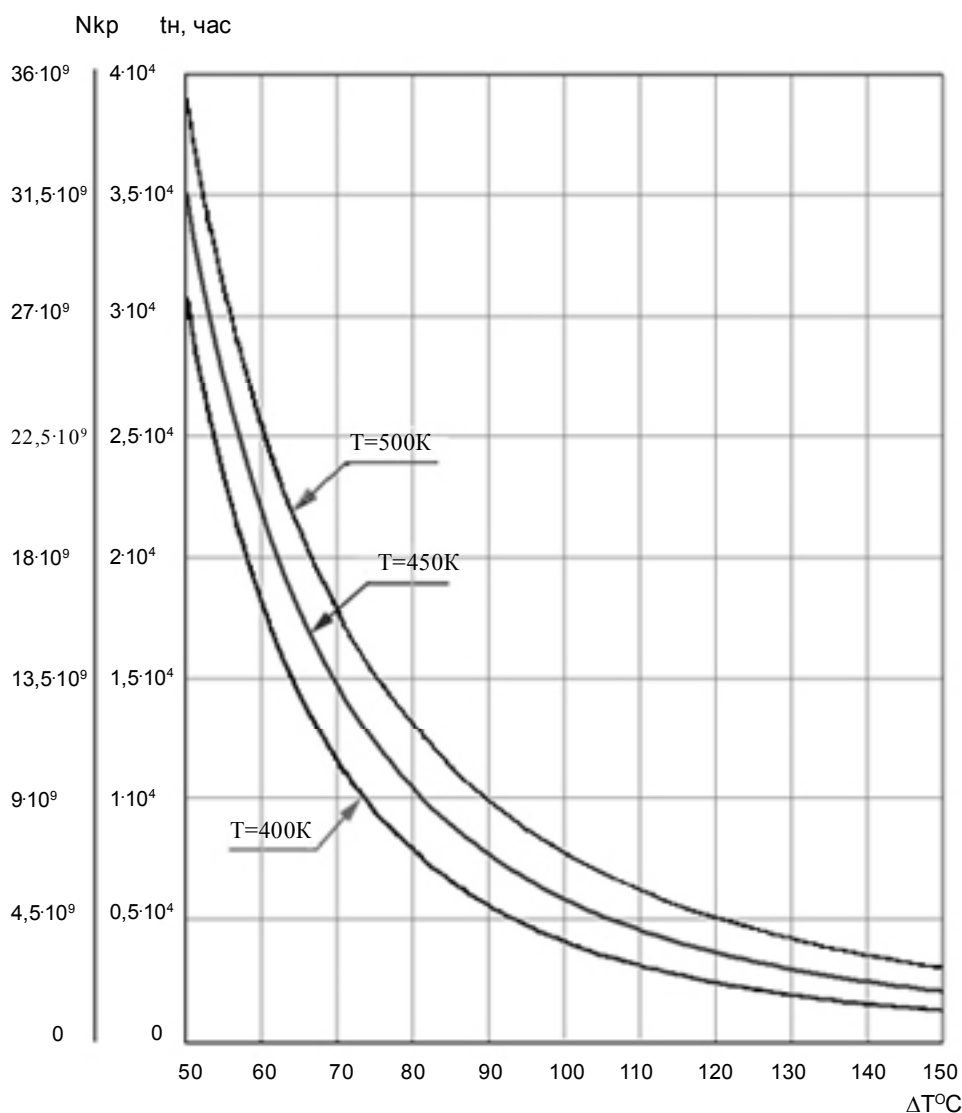


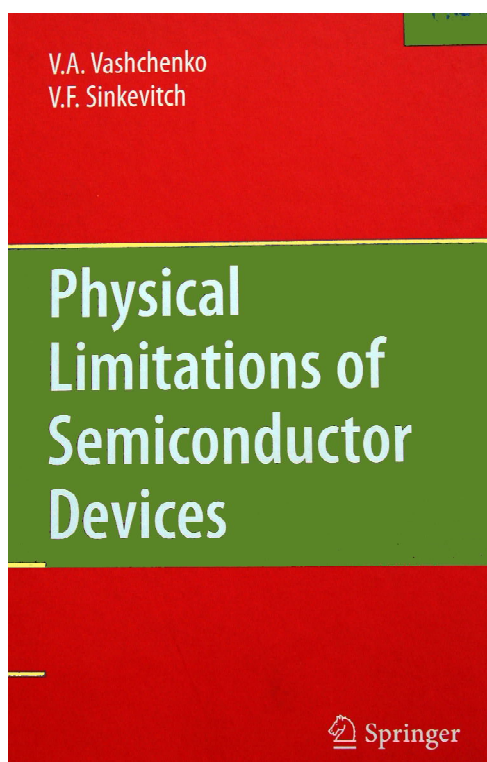
Рис. 1.

Теоретическая зависимость  $t_H$  и  $Nkp$  от амплитуды термоциклов  $\Delta T$  и абсолютного значения температуры  $T$

---

## Литература

1. Аленина Е. П., Рубаха Е. А. Ускоренные испытания мощных транзисторов в форсированных импульсных режимах. - *Электронная техника. Сер. 2*, 1989, в 5, с. 104-107.
  2. Десятов И. Б., Иванова Л. И., Рубаха Е. А. и др. Механизмы усталостной деградации структур мощных планарных приборов в импульсных режимах. - *Спецэлектроника. Сер. 2*, 1985, в 2, с. 111-121.
  3. Докучаев Ю. П., Синкевич В. Ф., Таран П. В. Разработка и производство СВЧ модулей для РЛС. - *Петербургский журнал электроники*, №3-4, 2004, с. 135-146.
  4. Sinha A. K., Sheng T. T. The temperature dependence of stresses in Al filme on SiO<sub>2</sub>. - *Thin Solid Films*, 1978, 48 №1, pi 17.
  5. Иванова Л. И., Рубаха Е. А. Особенности механизмов отказов и надёжность мощных СВЧ импульсных транзисторов. - *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*, 1983, вып. 7, с. 43-52.
  6. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. - М.: Металлургия, 1971, 264 стр.
- 



В издательстве "Springer"  
в мае 2008 года  
**вышла книга**  
сотрудников ФГУП "НПП "Пульсар"  
доктора технических наук,  
профессора **В. Ф. Синкевича**  
и доктора технических наук **В. А. Ващенко**.

Книга посвящена  
описанию физических ограничений областей  
допустимых режимов работы  
полупроводниковых приборов.