

# Возникновение генерационно-рекомбинационной неустойчивости в тонкопленочных структурах

© В.В. Колобаев

Московский энергетический институт,  
111250 Москва, Россия

(Получена 6 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Оценивалась возможность возникновения отрицательного дифференциального сопротивления в симметричных структурах металл–полупроводник–металл с малой толщиной пленки. Предложена модель, позволяющая в первом приближении объяснить природу возникновения данной бистабильности в результате генерационно-рекомбинационных процессов, протекающих в объеме образца при биполярной инжекции. Показана перспективность разработки и применения структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением в устройствах для регистрации и обработки информации.

В симметричных тонкопленочных структурах металл–полупроводник–металл (с толщиной пленки  $< 1 \mu\text{м}$ ) возникает участок с отрицательной дифференциальной проводимостью [1]. Можно предположить, что при этом толщина пленки сравнима с диффузионной длиной инжектируемых носителей, вследствие чего эффективная концентрация носителей заряда в пленке контролируется рекомбинационными процессами [2,3].

Цель данной работы заключалась в оценке такой возможности. На рис. 1 показана схема рассматриваемой структуры, которая использовалась в дальнейших расчетах. В схему включены только два типа переходов: генерационные  $Y_1, Y_2$  (стимулирующие нестабильность) и рекомбинационные  $T_{r1}, T_{r2}$  (обеспечивающие установление динамического равновесия).

Поскольку в задачу входило прежде всего выяснение возможности возникновения бистабильности и оценка зависимости порогового напряжения (соответствующего точке срыва) от генерационно-рекомбинационных параметров структуры, был сделан ряд упрощающих допущений. Предполагалось, что проводимость пленки близка к собственной, толщина пленки меньше дебаевской длины экранирования и диффузионной длины носителей заряда (можно пренебречь диффузионными процессами). Допускалось, что при высоких электрических полях имеет место двойная инжекция и возможно умножение как электронов, так и дырок.

Пренебрегая концентрацией собственных носителей заряда по сравнению с инжектированными, для структуры в целом можно записать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} n' &= Y_1 n + Y_2 p - T_{r1} n (N_t - n_t), \\ p' &= Y_1 n + Y_2 p - T_{r2} p n_t, \\ n_t' &= p' - n', \end{aligned} \quad (1)$$

$n, n_t, p$  — концентрации электронов в зоне проводимости и на уровне ловушек соответственно, а также дырок в валентной зоне,  $n', p'$  и  $n_t'$  — их производные по времени,  $Y_1$  и  $Y_2$  — зависящие от напряжения параметры, характеризующие умножение инжектированных носителей заряда,  $T_{r1}$  и  $T_{r2}$  — параметры, характеризующие

взаимодействие рекомбинационного уровня соответственно с зоной проводимости и валентной зоной,  $N_t$  — концентрация ловушек. Условие электронейтральности:  $n_t + n - p = 0$ .

Используя (1), при  $n_t' = 0$  найдем соотношение между стационарной концентрацией захваченных и свободных носителей заряда

$$n_t = \frac{T_{r1} N_t n}{T_{r1} n + T_{r2} p}. \quad (2)$$

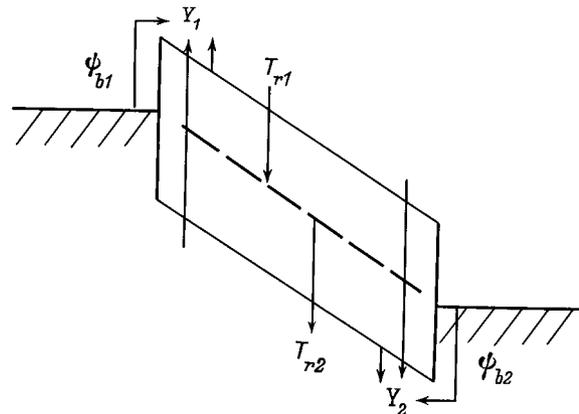
Используя (2) и первые два уравнения (1), получим

$$p = \frac{an \pm \sqrt{a^2 - 4Y_1 Y_2 T_{r1} T_{r2}}}{2T_{r1} T_{r2}}, \quad (3)$$

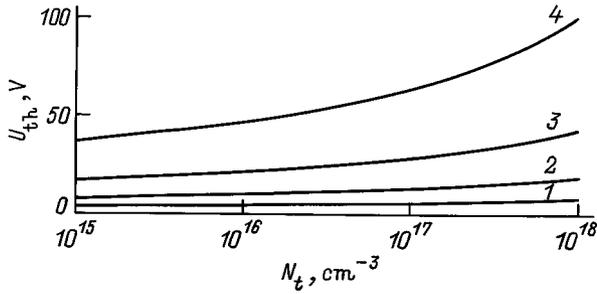
где  $a = T_{r1} T_{r2} N_t - 4Y_1 Y_2 T_{r1} T_{r2}$ .

Для нахождения концентраций свободных носителей заряда и захваченных электронов используются (1) и условие электронейтральности образца.

Система имеет устойчивое высокоомное состояние при нулевых концентрациях носителей заряда. Из (3)



**Рис. 1.** Схема, используемая для моделирования возникновения бистабильности.  $Y_1, Y_2$  — скорости генерации электронов и дырок в полупроводнике;  $T_{r1}, T_{r2}$  — коэффициенты захвата электронов и дырок уровнем ловушек;  $\phi_{b1}, \phi_{b2}$  — высоты контактных барьеров.



**Рис. 2.** Зависимость порогового напряжения  $U_{th}$  от концентрации ловушек  $N_t$  при толщинах пленки  $d$ , мкм: 1 — 0,5, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4.  $E_0 = 5 \cdot 10^5$  В/см,  $T_{r1} = T_{r2} = 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/с.

видно, что пороговое условие перехода от неустойчивого к устойчивому состоянию имеет место при

$$a^2 - 4Y_1Y_2T_{r1}T_{r2} = 0. \quad (4)$$

Допустим, что  $T_{r2} = T_{r1} = T_r$ ,  $Y_2 = Y_1 = Y$ , тогда условие срыва из (4) можно записать для структуры площадью  $S$  и толщиной  $d$  как

$$T_r N_t d S = 4Y. \quad (5)$$

Учитывая инжекцию из контактов и пренебрегая собственной концентрацией, для генерации носителей в образце можем записать

$$Y = \frac{4S\pi m^*(kT)^2}{h^3} e^{-\phi_b/kT} e^{-E_0/E} \quad (6)$$

( $\phi_b$  — высота контактного барьера). Из (5) и (6) можно определить пороговое значение напряжения срыва

$$U_{th} = \frac{E_0 d}{\ln[4\pi m^*(kT)^2/h^3 T_r N_t d] - \phi_b/kT}. \quad (7)$$

На рис. 2 показана зависимость порогового напряжения  $U_{th}$  от концентрации ловушек при различных толщинах пленки  $d$ . Видно, что имеет место плавное увеличение порогового напряжения с увеличением концентрации ловушек, однако эта зависимость слабая.

Проведенное рассмотрение позволяет сделать вывод, что при биполярной инжекции в тонкие полупроводниковые пленки в случае умножения носителей заряда возможен динамический фазовый переход [4], при котором пороговое напряжение контролируется генерационно-рекомбинационными параметрами пленки. Для малых толщин это напряжение становится сравнимым со значениями рабочих напряжений полупроводниковых приборов, что делает возможным применение структур этого типа в устройствах для регистрации и обработки информации. Быстродействие будет определяться временем накопления заряда на ловушках и для приборов с размерами порядка 0,1 мкм может составить величину порядка  $10^{-9}$  с, что делает тонкопленочные структуры с отрицательным дифференциальным сопротивлением генерационно-рекомбинационного типа перспективными.

Автор благодарит проф. Э.Н. Воронкова за полезные дискуссии.

## Список литературы

- [1] Э.Н. Воронков, В.В. Колобаев. *Токовая неустойчивость в тонких пленках теллурида кадмия. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах* (М., Изд-во МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1997) с. 206.
- [2] В.И. Стафеев. ФТТ, **16**, 841 (1959).
- [3] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [4] Э. Шёлль. *Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами* (М., Мир, 1991).

Редактор Л.В. Шаронова

## Occurrence of generation–recombination instability in thin film structures

V.V. Kolobaev

Moscow Power Engineering Institute,  
111250 Moscow, Russia

**Abstract** Possibility of negative differential resistance occurrence in symmetrical thin film structures of metal–semiconductor–metal type has been studied. A model has been suggested allowing to the first approximation explain the nature of this bistability as a result of generation and recombination processes taking place in the bulk under bipolar injection. It is shown that development and application of structures with negative differential resistance in devices for information registration and processing is rather promising.

Fax: +7-095-2582167 (Kolobaev)

E-mail: victor@lgtcm.ru (Kolobaev)