

06

Распределенная модель организации автоколебаний в полупроводнике, вызванных джоулевым саморазогревом

© А.В. Мелких, Ф.Н. Рыбаков, А.А. Повзнер

Уральский государственный технический университет, Екатеринбург
E-mail: mav@dpt.ustu.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2005 г.

Построена модель автоколебаний тока и напряжения в полупроводнике, вызванных саморазогревом. Учтено пространственное распределение температуры в образце в виде пластины. Найдены зависимости параметров автоколебаний от чисел подобия. Полученные зависимости могут быть использованы для управления генерацией автоколебаний в терморезисторах.

В литературе неоднократно рассматривались модели неустойчивости тока в полупроводнике, возникающей в результате саморазогрева [1–7]. Показано, что начиная с некоторой величины ширины запрещенной зоны ВАХ полупроводника становится S -образной, что может привести к организации автоколебаний тока и напряжения. Автоколебания тока и напряжения в полупроводнике использованы в ряде приборов, построенных на основе терморезисторов (см., например, [8–10]), однако теоретический анализ автоколебаний с учетом зависимости температуры образца от координат не проводился. Ранее авторами предложена точечная модель автоколебаний тока в полупроводнике при наличии саморазогрева, в которой температура образца считалась одинаковой [11]. Вместе с тем в случае саморазогрева при определенных размерах образца и условиях теплообмена с окружающей средой будет иметь место пространственное распределение температуры по объему образца. Такое распределение может привести к значительному изменению зависимостей амплитуды и периода автоколебаний от свойств образца по сравнению с точечной моделью.

Рассмотрим полупроводниковый образец в виде тонкой пленки, находящейся под воздействием постоянной разности потенциалов. Выбор геометрии образца обусловлен широким применением тонких пленок в

полупроводниковой технике, а также возможностью точного решения задачи. Ограничимся случаем, когда температура зависит только от поперечной координаты x (это верно для достаточно тонкой пленки) $T = T(x)$, а потенциал внутри образца зависит лишь от продольной координаты z : $\phi = \phi(z)$.

Будем полагать, что проводимость полупроводника удовлетворяет известному соотношению для собственных полупроводников [5]:

$$\sigma(T) = \sigma_{\infty} \cdot e^{\frac{-(E_{g0} - M \cdot T)}{2 \cdot k \cdot T}}. \quad (1)$$

Зависимость коэффициента теплопроводности полупроводника от температуры в общем случае включает фононную, электронно-дырочную, фотонную, а также экситонную составляющие [13]. Однако для ряда полупроводниковых материалов (например, для InSb) электронный вклад становится заметным лишь при температурах порядка 500 К и выше [12,13], экситонная и фотонная составляющие несущественны, фононная теплопроводность при температуре выше дебаевской обратно пропорциональна абсолютной температуре [12,13], и теплопроводность в довольно широком диапазоне температур можно представить зависимостью:

$$\lambda(T) = \frac{C_{\lambda}}{T}. \quad (2)$$

Температуру окружающей среды можно считать заданной и постоянной T_0 . При этом поток тепла с образца в окружающую среду будет пропорционален разности температур поверхности образца и окружающей среды:

$$\hat{O} = \alpha(T_s - T_0), \quad (3)$$

где T_s — температура поверхности образца, α — коэффициент теплоотдачи.

Система уравнений переноса в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) + \sigma \cdot \operatorname{grad}(\phi)^2 &= 0, \\ \operatorname{div}(\sigma \cdot \operatorname{grad}(\phi)) &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где ϕ — потенциал, σ — удельная электропроводность, λ — коэффициент теплопроводности образца.

Переходя к безразмерным переменным и интегрируя систему уравнений (4), получим зависимость плотности тока от приложенного напряжения:

$$c_2 \cdot j \cdot u - \frac{\frac{-1}{AEi\left(Ei\left(\frac{-1}{c_1+j \cdot u}\right) - j^2 \cdot c_2\right)}}{\int_{c_1+j \cdot u}^{\infty} \frac{1}{p \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{j^2 \cdot c_2} \cdot \left(Ei\left(\frac{-1}{p}\right) - Ei\left(\frac{-1}{c_1+j \cdot u}\right)\right)}} dp = 0, \quad (5)$$

где

$$\sigma_0 = \sigma_\infty \cdot e^{\frac{M}{2 \cdot k}}, \quad T_\sigma = \frac{E_{g0}}{2 \cdot k}, \quad Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^x}{x} dx,$$

$$X = \frac{J \cdot U}{2 \cdot L \cdot H \cdot \alpha \cdot T_\sigma}, \quad c_1 = \frac{T_0}{T_\sigma},$$

$$c_2 = h \cdot \frac{\alpha \cdot T_\sigma}{C_\lambda}, \quad Y = \frac{J^2}{8 \cdot L^2 \cdot C_\lambda \cdot \sigma_0},$$

$$j = \sqrt{\frac{Y}{c_2}} = J \cdot \frac{1}{2 \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma_0 \cdot h \cdot \alpha \cdot T_\sigma}},$$

$$u = X \cdot \sqrt{\frac{c_2}{Y}} = U \cdot \frac{1}{H} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot h}{\alpha \cdot T_\sigma}}.$$

Численное интегрирование уравнения (5) показывает, что ВАХ может иметь участок отрицательного дифференциального сопротивления. Как известно, наличие такого участка может привести к организации автоколебаний [6].

Использование терморезисторов в качестве автогенераторов позволяет получать сверхнизкочастотные автоколебания, которые могут быть использованы в различных технических целях (например, для измерения температуры окружающей среды). Работа генератора в таком

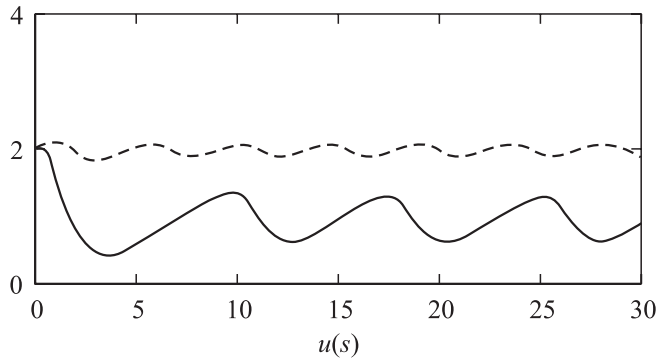


Рис. 1. Временные зависимости напряжения в цепи с терморезистором: $c_1 = 0.24$, $c_2 = 10$, $c_3 = 0.1$, $j_0 = 0.1$, $u_0 = 2$, $p_0 = c_1$; пунктир — точечная модель; сплошная линия — распределенная модель.

случае описывается уравнениями (в безразмерном виде):

$$\frac{d}{ds} p = \frac{u^2}{2 \cdot c_3} \cdot \exp\left(\frac{-1}{p}\right) + \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{p} \cdot \frac{d}{dr} p\right) \cdot \frac{1}{c_2 \cdot c_3},$$

$$\frac{d}{ds} u = 2j_0 - u \cdot \int_0^1 \exp\left(\frac{-1}{p}\right) dr,$$

$$\left(\frac{d}{dr} p\right)_{r=1} = -c_2 \cdot p_{r=1} \cdot (p_{r=1} - c_1), \quad \left(\frac{d}{dr} p\right)_{r=0} = 0, \quad (6)$$

где $c_3 = \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot L \cdot \sigma_0 \cdot h^2}{\alpha \cdot C \cdot H}$ — безразмерная величина, зависящая от тепловой и электрической емкостей образца, а также от его размеров. Физический смысл константы c_3 — отношение характерного времени теплообмена к емкостному времени.

В результате численного решения системы уравнений (6) получаем зависимости параметров автоколебаний от свойств полупроводника и окружающей среды. В частности, увеличение константы c_2 , пропорциональной числу Нуссельта, приводит к существенному различию точечной и распределенной моделей (рис. 1).

Следовательно, при больших числах c_2 (хороший теплообмен с окружающей средой, большая толщина пленки) точечная модель не

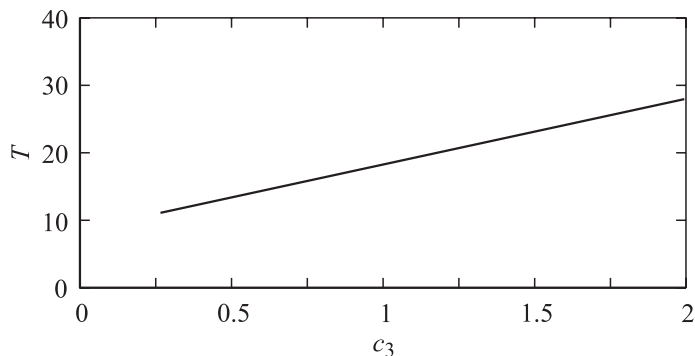


Рис. 2. Зависимость периода автоколебаний от величины c_3 , аппроксимированная прямой $T = 8 + 13c_3$; $c_1 = 0.24$, $c_2 = 10$, $j_0 = 0.1$, $u_0 = 0$, $p_0 = c_1$.

может быть использована для нахождения параметров автоколебаний и необходимо использовать более точную распределенную модель. Причем при увеличении c_3 период колебаний увеличивается (рис. 2).

Таким образом, изменяя условия теплообмена образца, его размеры или ширину запрещенной зоны, можно оптимизировать работу автогенератора на терморезисторе, получая заданные величины периода и амплитуды автоколебаний. В частности, для увеличения периода автоколебаний необходимо уменьшать теплоотдачу полупроводника в окружающую среду или увеличивать его размеры.

Список литературы

- [1] *Shaw M.P., Yildirim N.* // Advances in electornics and electron physics. 1982. V. 60. P. 307–385.
- [2] *Altchen L., Klein N.* // IEEE transactions on electron devices. 1973. V. ED–20. P. 801–811.
- [3] *Alekseev A., Bose S., Rodin P., Scholl E.* // Physical Review. E. 1998. V. 57. N 3. P. 2640–2649.
- [4] *Rodin P.* // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. N 045307. P. 1–11.
- [5] *Ю П., Кардона М.* Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002. 560 с.

- [6] Шель Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами. М.: Мир, 1991. 464 с.
- [7] Волков А.Ф., Коган Ш.М. // УФН. 1968. Т. 96. № 4. С. 633.
- [8] Мэглин Э.Д. Терморезисторы. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.
- [9] Шефтель И.Т. Терморезисторы. Электропроводность $3d$ -окислов. Параметры, характеристики и области применения. М.: Наука, 1973. 415 с.
- [10] Кривоносов А.И. Полупроводниковые датчики температуры. М.: Энергия, 1974. 184 с.
- [11] Мелких А.В., Повзнер А.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 14–18.
- [12] Могилевский Б.М., Чудновский А.Ф. Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972. 536 с.
- [13] Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977. 615 с.