

## Краткие сообщения

05;06

### Влияние доли полупроводниковых включений на свойства автоколебаний в системе металл—полупроводник

© А.В. Мелких, А.А. Повзнер, А.Н. Черепанова

Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, Россия  
e-mail: mav@ntp.ustu.ru

(Поступило в Редакцию 4 июня 2008 г. В окончательной редакции 15 марта 2009 г.)

Построена модель автоколебаний в гетерофазной системе, состоящей из слоев металла и полупроводника. Показано, что, изменяя долю металлических включений в полупроводнике, можно управлять параметрами автоколебаний (амплитудой, периодом). Численное решение системы уравнений для гетерофазной системы показало, что чем больше температурный коэффициент сопротивления металла, тем сильнее влияет металлическая примесь на свойства гетерофазной системы, уменьшая при этом эффективную ширину ее запрещенной зоны и затрудняя реализацию автоколебаний.

PACS: 72.20.Fr, 72.20.Ht

Интенсивное развитие нанотехнологий в электронике приводит к тому, что проводящие элементы становятся все меньше и все более сложно устроены. При этом актуальными остаются процессы отвода тепла от электронных схем. В нанотехнологиях все чаще используются композиционные материалы, когда проводящие элементы представляют собой гетерофазную систему, особым образом организованную в пространстве (см., например, [1]). В частности, перспективным представляется сочетание полупроводниковых и металлических областей в проводящих элементах. Управляя долей и формой полупроводниковых включений в металле (или металлических в полупроводнике), можно получить материал с заданными свойствами и служебными характеристиками. Одной из таких характеристик является температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Как было показано ранее, на основе свойства сильной зависимости сопротивления полупроводника от температуры можно построить автогенератор (см., например, [2]). Именно сравнительно большой отрицательный ТКС является необходимым условием построения такого автогенератора. Практическую важность и теоретический интерес представляет вопрос о том, при каких резистивных свойствах гетерофазной системы на основе металла и полупроводника можно реализовать автоколебания? Как будут зависеть свойства этих автоколебаний от доли включений различных фаз и их формы?

#### Постановка задачи

Чтобы ответить на эти и другие вопросы, рассмотрим простую модельную систему, состоящую из параллельных слоев полупроводника и металла. Реальная гетерофазная система может быть устроена гораздо более

сложно, однако важно понять, как будет вести себя система в простых случаях. Ранее были построены модели автоколебаний в чистой полупроводниковой системе с саморазогревом [3,4], но автоколебания в гетерофазной системе не рассматривались.

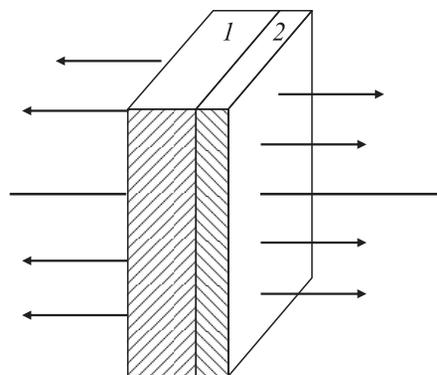
Для того чтобы записать, следуя идеологии, изложенной ранее [4], уравнения баланса заряда и энергии, используем следующие предположения:

1. Температура постоянна внутри всего гетерофазного образца. Это верно, когда основное тепловое сопротивление будет сосредоточено на его поверхности.

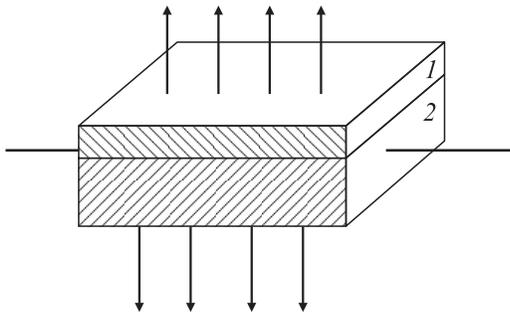
2. Теплообмен происходит в основном с поверхности пластин.

Рассмотрим последовательное и параллельное соединение слоев полупроводника и металла.

На рис. 1 и 2 стрелками показан поток тепла с поверхности в окружающую среду.



**Рис. 1.** Последовательное соединение слоев полупроводника и металла (1 — слой металла, 2 — слой полупроводника, стрелками показан поток тепла с поверхности в окружающую среду).



**Рис. 2.** Параллельное соединение слоев полупроводника и металла (1 — слой металла, 2 — слой полупроводника, стрелками показан поток тепла с поверхности в окружающую среду).

В данной постановке задачи не является принципиальным количество слоев, а только доля металлической и полупроводниковой фаз. Используем модель саморазогрева при протекании тока в полупроводнике, предложенную ранее [4]. Для проводимости чистого полупроводника было использовано выражение

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right), \quad (1)$$

где  $E_{g0}$  — ширина запрещенной зоны.

Однако если последовательно с чистым полупроводником будет расположен слой металла, то проводимость такой гетерофазной системы может быть записана в виде (штрихи опускаем):

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sigma_s \sigma_m}{\sigma_s + \sigma_m} = \frac{\sigma_{0s} \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right) \frac{\sigma_{m0}}{1+\beta(T-T_0)}}{\sigma_{0s} \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right) + \frac{\sigma_{m0}}{1+\beta(T-T_0)}}.$$

Рассмотрим нестационарную постановку задачи и запишем уравнения баланса тока и тепла в гетерофазной системе. Как и ранее [4], будем считать, что образец включен в цепь, в которой имеются емкость  $C$  и индуктивность  $L$ .

Пусть входной ток является заданным. Тогда уравнение баланса заряда в образце можно записать в виде ( $I_{in}$  — входной ток):

$$C \frac{dU}{dt} = I_{in} - I. \quad (2)$$

Уравнение баланса тепла

$$cm \frac{dT}{dt} = IU - \alpha S(T - T_0), \quad (3)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость образца,  $m$  — масса образца,  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $S$  — площадь поверхности образца. Будем считать, что основное тепловое сопротивление сосредоточено на поверхности образца и температура его практически одинакова. Подробно такая ситуация была рассмотрена в работах [3,4].

Тогда, используя (1), запишем выражение для вольт-амперной характеристики образца:

$$I = \sigma_{\Sigma} U. \quad (4)$$

Вследствие саморазогрева такого образца его вольт-амперная характеристика является нелинейной. С учетом наличия индуктивности в системе можно записать систему уравнений для безразмерных переменных ( $\frac{T}{T_0} \equiv T'$ ,  $\frac{E_{g0}}{2kT_0} \equiv E'_{g0}$ ,  $dt' \equiv \frac{\alpha S}{cm} dt$ ,  $I \equiv I' \sqrt{\alpha S T_0 \sigma_0}$ ,  $U \equiv U' \sqrt{\frac{\alpha S T_0}{\sigma_0}}$ ) в соответствии с [4] в виде:

$$\frac{dT}{dt} = IU - T + 1, \quad (5)$$

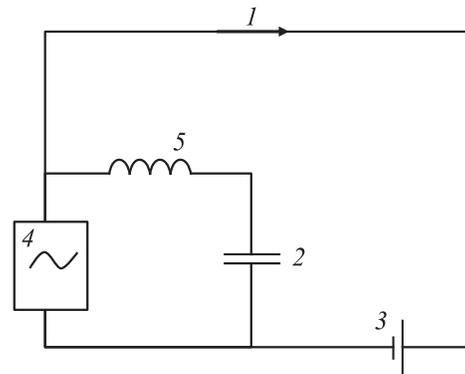
$$z \frac{dI}{dt} = U - I \left( \exp\left(\frac{E_{g0}}{T}\right) + \gamma(1 + \beta(T - 1)) \right), \quad (6)$$

$$y \frac{dU}{dt} = I_{in} - I, \quad (7)$$

где  $C \frac{\alpha S}{cm \sigma_0} = y$ ,  $\frac{\alpha S \sigma_0 L}{cm} = z$  — безразмерные константы, представляющие собой отношение характерных значений времени процессов накопления заряда и индуктивности ко времени теплообмена,  $\gamma = \sigma_{0s} / \sigma_{0m}$  — отношение максимальной проводимости полупроводника к проводимости металла при температуре окружающей среды,  $\beta$  — безразмерный ТКС металла. Если оба материала и площадь поперечного сечения образцов считать заданными, то величина  $\gamma$  будет пропорциональна отношению толщины слоя металла к толщине слоя полупроводника.

Система уравнений (5)–(7) должна быть дополнена начальными условиями для трех переменных. Поскольку в данной модели исследуются не переходные процессы, а квазистационарные автоколебания, то влияние начальных условий не существенно. При расчетах начальные условия выбирались в интервале колебаний каждой переменной.

Система уравнений (5)–(7) отличается от полученной ранее наличием металлической фазы с другой зависимостью проводимости от температуры. При  $\gamma = 0$



**Рис. 3.** Схема автоколебательной системы ( $I$  — ток, 2 — емкость, 3 — ЭДС, 4 — образец с сопротивлением, зависящим от температуры, 5 — индуктивность).

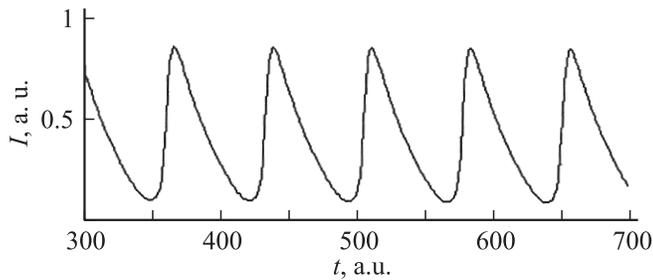


Рис. 4. Зависимость тока от времени для значений  $z = 2$ ,  $\tau = 10$ ,  $E = 5.5$ ,  $I = 0.4$ ,  $\gamma = 2.2$ ,  $\beta = 0.01$ .

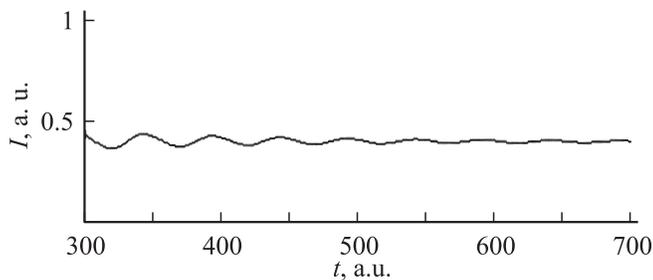


Рис. 5. То же, что для рис. 4,  $\beta = 0.03$ .

система превращается в полученную ранее для чистого полупроводника [4].

## Решение

Система уравнений (5)–(7) решалась численно. Например, для значений  $z = 2$ ,  $\tau = 10$ ,  $E = 5.5$ ,  $I = 0.4$ ,  $\gamma = 2.2$ ,  $\beta = 0.01$  получена зависимость тока от времени, представленная на рис. 4.

При увеличении, например ТКС металла до  $\beta = 0.03$  колебания становятся затухающими (рис. 5).

Если параллельно с чистым полупроводником расположен слой металла (рис. 2), то проводимость такой гетерофазной системы может быть записана в виде

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_s + \sigma_m = \sigma_{0s} \exp\left(-\frac{E_{go}}{2kT}\right) + \frac{\sigma_{m0}}{1 + \beta(T - T_0)}.$$

При этом система уравнений (5)–(7) дает качественно сходную картину автоколебаний для параллельного соединения. Сравнение полученных численно результатов для гетерофазной системы и для чистого полупроводника позволяет сделать вывод о том, что гетерофазная система, состоящая из слоя металла и полупроводника, при сравнительно малой доле металла ведет себя как полупроводник с несколько меньшей шириной запрещенной зоны. При добавлении металла ТКС такой системы будет уменьшаться по абсолютной величине, оставаясь отрицательным. Если ТКС системы будет нулевым или положительным (при большой доле металла), то в системе будет отсутствовать отрицатель-

ное дифференциальное сопротивление, и как следствие, автоколебания будут невозможны.

## Заключение

На основе решения уравнений для гетерофазной системы можно сделать следующие выводы.

1. Металлическая примесь в чистом полупроводнике позволяет управлять параметрами автоколебаний (амплитудой и периодом). Упорядоченно располагая металлические включения, можно получать заданные параметры автоколебаний.

2. Чем больше ТКС металла, тем сильнее влияет металлическая примесь на свойства гетерофазной системы, уменьшая при этом эффективную ширину ее запрещенной зоны и затрудняя реализацию автоколебаний.

3. Изменение доли металла в гетерофазной системе будет приводить к изменению эффективного ТКС системы. Увеличение доли металла затрудняет реализацию автоколебаний при последовательном соединении. При этом система ведет себя как полупроводник с меньшей шириной запрещенной зоны.

4. При определенной доле металла (зависящей от того, последовательно расположены слои металла или параллельно) автоколебания в гетерофазной системе исчезают.

## Список литературы

- [1] Гречихин Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий: Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства. УП „Технопринт“, 2004. 398 с.
- [2] Мэглин Э.Д. Терморезисторы. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.
- [3] Мелких А.В., Рыбаков Ф.Н., Повзнер А.А. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 16. С. 67–72.
- [4] Мелких А.В., Повзнер А.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 6. С. 14–18.