

06

## Условия существования автоколебаний в полупроводнике при наличии саморазогрева

© А.В. Мелких, А.А. Повзнер

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

Поступило в Редакцию 27 сентября 2002 г.

Рассмотрены условия возникновения автоколебаний в полупроводнике, имеющем  $S$ -образную вольт-амперную характеристику. Определены зависимости периода и амплитуды автоколебаний от ширины запрещенной зоны полупроводника, а также от отношений характерных времен процессов накопления заряда и индуктивности ко времени теплообмена с окружающей средой.

Существует группа полупроводников с узкими зонами, в которых в результате саморазогрева проводимость может измениться скачком. В результате вольт-амперная характеристика будет иметь  $S$ -образный вид [1,2]. В работах [3,4] найдены критические параметры вольт-амперной характеристики указанного типа, в том числе и для перехода полупроводник–металл. Поскольку вольт-амперная характеристика имеет  $S$ -образный вид, то при определенных значениях тока будет отсутствовать стационарное решение для разности потенциалов на образце, т. е. будут иметь место автоколебания. Подобные автоколебания неоднократно рассматривались в литературе, в том числе и для полупроводниковых систем (например, автоколебания в генераторе Ван дер Поля). Вместе с тем в литературе отсутствуют параметры автоколебаний для полупроводников с  $S$ -образной вольт-амперной характеристикой (т. е. зависимости периода, амплитуды, формы от величины управляющего тока, размеров образца, ширины запрещенной зоны и т. д.).

Для проводимости полупроводника можно записать выражение

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

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны.

Рассмотрим полупроводник в виде провода круглого сечения радиусом  $R$ . Будем иметь в виду, что тепло, выделяющееся в образце, идет на его нагрев.

Рассмотрим нестационарную постановку задачи и запишем уравнения баланса тока и тепла в цилиндрическом полупроводнике. Пусть входной ток является заданным. Тогда уравнение баланса заряда в образце можно записать в виде ( $I_m$  — входной ток):

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

Уравнение баланса тепла

$$cm \frac{dT}{dt} = IU - \alpha 2\pi R(T - T_0), \quad (3)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость образца,  $m$  — масса образца,  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи. Будем считать, что основное тепловое сопротивление сосредоточено на поверхности образца и температура его практически одинакова. Эта ситуация соответствует характерному радиусу шнура тока, равному радиусу проводника [4]. Тогда, используя (1), запишем выражение для вольт-амперной характеристики образца:

$$I = \sigma_0 U \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right). \quad (4)$$

Вследствие наличия обратной связи вольт-амперная характеристика является нелинейной. С учетом наличия индуктивности в системе уравнение (4) можно записать в виде

$$I = \sigma_0 \left( U - L \frac{dI}{dt} \right) \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right) \quad (5)$$

или

$$L \frac{dI}{dt} = U - \frac{I}{\sigma_0} \exp\left(\frac{E_{g0}}{2kT}\right). \quad (6)$$

Перейдем к безразмерным переменным

$$\frac{T}{T_0} \equiv T', \quad \frac{E_{g0}}{2kT_0} \equiv E'_{g0}, \quad dt' \equiv \frac{\alpha 2\pi R}{cm} dt,$$

$$I \equiv I' \sqrt{\alpha 2\pi R T_0 \sigma_0}, \quad U \equiv U' \sqrt{\frac{\alpha 2\pi R T_0}{\sigma_0}}, \quad (7)$$

$$\frac{dT'}{dt'} = I'U' - (T' - 1), \quad (8)$$

$$\frac{\alpha 2\pi R \sigma_0 L}{cm} \frac{dI'}{dt'} = U' - I' \exp\left(\frac{E'_{g0}}{T'}\right), \quad (9)$$

$$C \frac{\alpha 2\pi R}{cm \sigma_0} \frac{dU'}{dt'} = I'_{in} - I'. \quad (10)$$

Опуская штрихи, получаем окончательно систему уравнений

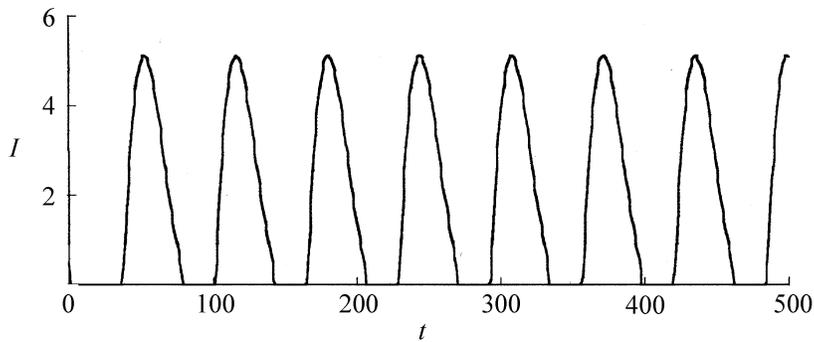
$$\frac{dT}{dt} = IU - T + 1, \quad (11)$$

$$z \frac{dI}{dt} = U - I \exp\left(\frac{E_{g0}}{T}\right), \quad (12)$$

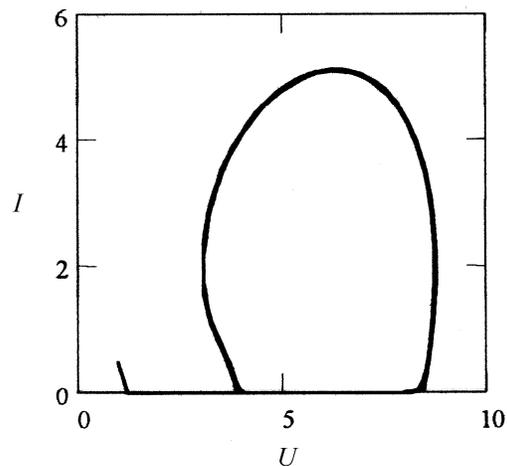
$$y \frac{dU}{dt} = I_{in} - I, \quad (13)$$

где  $C \frac{\alpha 2\pi R}{cm \sigma_0} = y$ ,  $\frac{\alpha 2\pi R \sigma_0 L}{cm} = z$  — безразмерные константы, представляющие собой отношение характерных времен процессов накопления заряда и индуктивности ко времени теплообмена.

Проанализируем поведение системы в частном случае, когда теплообменное время значительно меньше емкостного и индуктивного времени.



**Рис. 1.** Зависимость тока от времени для  $y = 10$ ,  $z = 10$ ,  $E_{g0} = 7$ ,  $I_{in} = 2$ .



**Рис. 2.** Аттрактор системы — предельный цикл для  $y = 10$ ,  $z = 10$ ,  $E_{g0} = 7$ ,  $I_{in} = 2$ .

Система уравнений (11)–(13) решалась численно с использованием пакета MathCad. В результате были получены временные зависимости напряжения и тока, а также аттрактор системы (рис. 1, 2).

Анализ временного поведения рассматриваемой системы позволяет сделать следующие выводы:

1. При увеличении величин  $z$  и  $y$  период автоколебаний возрастает. При увеличении величины  $y$  до определенного значения происходит переход к затухающим колебаниям.

2. Автоколебания наблюдаются лишь в определенном интервале значений управляющего тока. Границы этого интервала соответствуют особым точкам на  $S$ -образной вольт-амперной характеристике. Вне интервала существуют только затухающие колебания либо релаксационный процесс.

3. Автоколебания существуют при определенных значениях ширины запрещенной зоны. Начиная с определенной величины  $E_{g0}$  (для указанных на графиках параметров примерно с 6.9) рост ширины запрещенной зоны приводит к увеличению амплитуды и периода автоколебаний. При меньших значениях  $E_{g0}$  колебания являются затухающими.

**Список литературы**

- [1] *Волков А.Ф., Коган Ш.М.* // УФН. 1968. Т. 96. № 4. С. 633.
- [2] *Кроткус А., Добровольский З.* Электропроводность узкощелевых полупроводников. Вильнюс: Моклас, 1988. 172 с.
- [3] *Мелких А.В., Повзнер А.А., Андреева А.Г., Сачков И.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 6. С. 19–25.
- [4] *Мелких А.В., Повзнер А.А.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 7. С. 141–142.