

01;06;09

©1994

О РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ОРГАНИЧЕСКИЙ ПОЛУПРОВОДНИК С НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Д.В.Любимов, Б.Л.Сморodin

Существуют органические полупроводники, например соли TCNQ (тетрацианохинодиметана), электропроводность σ которых нелинейным образом зависит от температуры T и имеет явно выраженный максимум σ_0 [1]. Известно, что в нелинейных неравновесных средах могут возникать пространственные структуры [2]. К ним относятся ячейки Бенара, когерентные структуры в турбулентности, спирали и концентрические волны в реакции Белоусова-Жаботинского [3]. Существование подобных структур поддерживается за счет баланса между диссипацией и поступлением энергии от источника неравновесности.

При прохождении тока через полупроводник с немонотонной зависимостью электропроводности от температуры в образце будут идти два процесса: разогрев током и обмен теплом с окружающей средой. При больших температурах основную роль играет охлаждение, при малых — нагрев образца. Кроме состояний равновесия, в которых во внешнюю среду отдается столько тепла, сколько выделяется, в полупроводнике могут возникать периодические пространственные распределения электрических и тепловых величин.

В настоящей работе рассмотрен полупроводник с током малого поперечного сечения: релаксационные процессы быстро выравнивают значения всех величин вдоль радиуса образца, оставляя возможность их изменения вдоль него. Теплоток с торцов полупроводника отсутствует. Разность потенциалов на концах образца, а вместе с ней и среднее поле в полупроводнике поддерживаются постоянными. Зависимость $\sigma(T)$ модулируется законом $\sigma = \sigma_0(bT^2 + 1)^{-1}$, который качественно отражает основные особенности [1] (b характеризует полуширину кривой $\sigma(T)$, а температура максимума электропроводности принята за начало отсчета температуры).

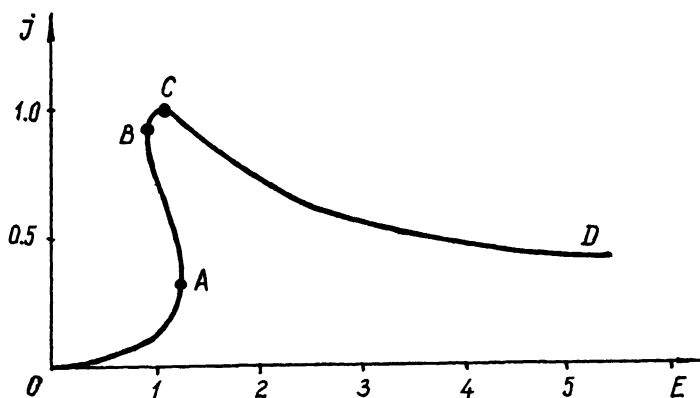


Рис. 1. Стационарные, пространственно однородные режимы. Зависимость плотности тока j от напряженности поля E . $\theta = 8$.

Выберем единицы измерения температуры, времени, расстояния, напряженности, плотности тока, плотности заряда: $|T_0|$, $1/\beta$, $(\chi/\beta)^{1/2}$, $(\beta\rho_V C_V |T_0|/\sigma_0)^{1/2}$, $(\sigma_0\beta\rho_V C_V |T_0|)^{1/2}$, $(\sigma_0\rho_V C_V |T_0|/\chi)^{1/2}$, где C_V — удельная теплоемкость, ρ_V — плотность, χ — температуропроводность, β — коэффициент теплоотдачи, T_0 — температура окружающей среды. Тогда система уравнений, характеризующих состояние образца, запишется в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + jE - (T + 1), \quad j = \sigma E,$$

$$\frac{\partial j}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial x} = A\rho, \quad \sigma = (\theta T^2 + 1)^{-1},$$

где j — плотность тока, ρ — плотность заряда. Задача содержит четыре безразмерных параметра: L — длина образца, E^* — среднее поле, $\theta = bT_0^2$, $A = 4\pi\sigma_0/\beta$.

Для стационарных пространственно-однородных режимов плотность тока и напряженность поля связаны соотношением

$$\theta j^3 E^2 + (2\theta j^2 + 1)E + j(\theta + 1) = 0.$$

При $\theta \geq 3$ зависимость $j(E)$ имеет S-образный характер. Диаграмма состояний $j(E)$ при $\theta = 8$ приведена на рис. 1. В некотором интервале изменения поля E существуют три режима прохождения тока. В зависимости от стационарной температуры однородные решения можно классифицировать как “холодные” — участок 0A, “теплые” — участок AB и “горячие” режимы — BCD.

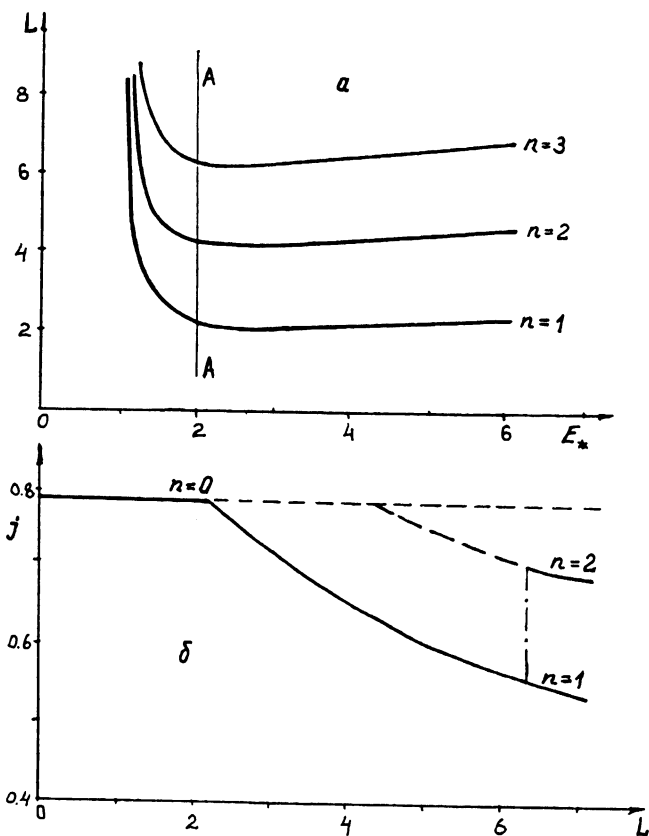


Рис. 2. Пространственно неоднородные режимы. $\theta = 4$.
 а — Нейтральные кривые малых возмущений, б — карта режимов тока в образце.

Устойчивость пространственно-однородных решений относительно малых пространственно-неоднородных возмущений исследована аналитически, относительно возмущений конечной амплитуды численно, методом конечных разностей. Установлено, что участки $0A$ и BC устойчивы при любых начальных условиях и внешних параметрах, "теплые режимы" AB абсолютно неустойчивы. На участке CD

при длине образца, не превышающей критическое значение L_* , $L_* = \pi(\theta + 1)^{-1/4}$, однородные режимы нагрева устойчивы относительно любых возмущений. При $L > nL_*$ пространственно-однородное решение участка CD становится неустойчивым относительно малых возмущений температуры с числом узлов от 1 до n . Плотность тока, при котором от однородного режима ответвляется периодическое решение, определяется выражением

$$j_n = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\left(1 + \frac{1}{\theta} \right) \left(1 - \frac{n^4 L_*^4}{L^4} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad n = 1, 2, \dots$$

На рис. 2, а представлены нейтральные кривые возмущений на плоскости параметров (E_*, L) ; $\theta = 4$. Область, расположенная ниже кривой $n = 1$, соответствует устойчивости однородных режимов.

Карта режимов тока в образце, устанавливающихся в результате нарастания возмущений конечной амплитуды, представлена на рис. 2, б для среднего поля $E_* = 2$, $\theta = 4$ (линия AA на рис. 2, а). *Сплошными* линиями обозначены устойчивые режимы, *штриховыми* — неустойчивые. При $L = L_*$ устойчивость однородного режима передается первой моде. При $L \geq 2L_*$ первая мода остается устойчивой, рождается неустойчивая вторая мода. Когда длина L достигает значения $3L_*$, возникает множественность пространственно-неоднородных режимов. В зависимости от начальных условий возможно устойчивое распределение $T(x)$ и $E(x)$, соответствующее либо первой, либо второй моде.

Список литературы

- [1] Epstein J., Cowel M. // Sol. St. Commun. 1977. U. 24. P. 627-630.
- [2] Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М., 1985. 423 с.
- [3] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М., 1984. 432 с.

Пермский государственный
университет

Поступило в Редакцию
11 февраля 1994 г.