

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В СРЕДЕ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ПОЛУПРОВОДНИК – МЕТАЛЛ

Ю.Д.Калафати, И.А.Сербинов, Л.А.Рябова

Теоретически определяются условия возникновения нелинейной температурной волны в среде с фазовым переходом полупроводник – металл и выводится формула для скорости их распространения. Описывается эксперимент, в котором наблюдались нелинейные волны в пленках VO_2 .

Нелинейные волны в твердых телах являются предметом постоянного интереса, Особенно интерес к этому кругу вопросов усилился после открытия генерации СВЧ колебаний в полупроводниках – эффект Ганна. Важная особенность нелинейных явлений – это наличие участка с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) на вольт-ам-

перной характеристике (ВАХ). Состояния с ОДП оказываются неустойчивыми [1] относительно пространственно-неоднородных флуктуаций. В полупроводниках с *N*-образной характеристикой такая неустойчивость проявляется в виде движущихся доменов [2]; предполагается [3], что для *S*-образной ВАХ неустойчивость проявится в виде нелинейных температурных волн.

В настоящей статье теоретически определяются условия возникновения таких волн в среде с фазовым переходом полупроводник — металл (ФППМ) и выводится формула для скорости их распространения. Описывается эксперимент, в котором наблюдались нелинейные волны в пленках VO_2 .

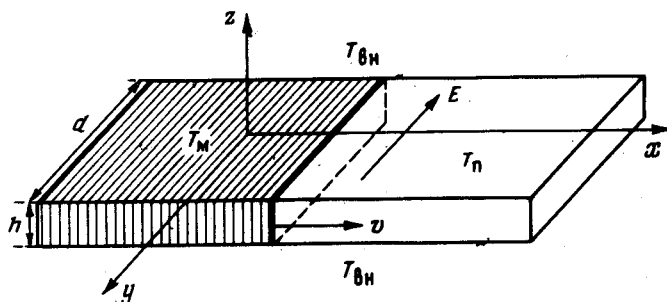


Рис. 1

Однородная тонкая пленка вещества с ФППМ (см. рис. 1), с шириной d и неограниченная вдоль оси x , находится в среде, температура которой $T_{\text{ВН}}$ поддерживается постоянной. В пленке создано постоянное электрическое поле E , направленное в плоскости пленки перпендикулярно оси x . Поле создает ток, который течет по пленке и разогревает ее до стационарной температуры T . Будем считать, что температура пленки постоянна по толщине и не меняется вдоль оси y . Это соответствует приближению тонкой пленки, а также условию, что теплопроводом вдоль оси y можно пренебречь; последнее выполняется, если $h/d \ll 1$, где h — толщина пленки. Все сказанное означает, что уравнение теплового баланса в данной модели зависит от одной пространственной переменной и имеет вид:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \sigma(T) E^2 - \frac{\alpha}{h} (T - T_{\text{ВН}}). \quad (1)$$

Плотность ρ , теплопроводность κ , коэффициент теплоотдачи α слабо меняются при фазовом переходе (ФП), поэтому зависимостью их от температуры для простоты будем пренебрегать. Будем рассматривать ФП первого рода с температурной зависимостью проводимости и теплоемкости соответственно вида:

$$\sigma(T) = \sigma_{\text{П}} + (\sigma_{\text{М}} - \sigma_{\text{П}}) \theta(T - T_0),$$

$$C(T) = C_1 + a_0 \delta(T - T_0),$$

где $\sigma_{\text{П}}$ — проводимость полупроводниковой фазы, $\sigma_{\text{М}}$ — проводимость металлической фазы, C_1 — теплоемкость, не зависящая от температуры,

q_0 — теплота фазового перехода, $\theta(T)$ — тета-функция, $\delta(T)$ — дельта-функция, T_0 — температура равновесного ФППМ.

Рассмотрим стационарные однородные решения, тогда

$$\sigma(T)E^2 - \frac{\alpha}{h} (T - T_{\text{ВН}}) = 0. \quad (2)$$

Корни уравнения (2) определяют стационарную температуру пленки, как функцию E и $T_{\text{ВН}}$. На рис. 2 показана зависимость стационарной температуры T от поля E при фиксированной температуре окружающей среды $T_{\text{ВН}}$. Зависимость имеет S-образный вид и для полей $E_1 < E < E_2$ уравнения (2) имеет три стационарных решения, два из которых $T_{\text{П}}$ и $T_{\text{М}}$ являются устойчивыми состояниями системы, а T_0 — неустойчивое.

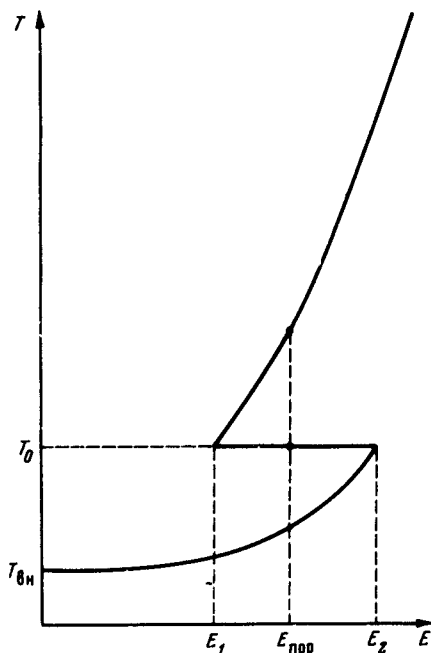


Рис. 2

Уравнения, аналогичные (1) с правой частью, обращаемой в нуль в трех точках, рассматривались в работах [4, 5]. Асимптотическое решение уравнения (1), описывающее переход между устойчивыми состояниями, представляет собой пару расходящихся волновых фронтов. В случае ФП волновой фронт описывает границу раздела фаз. Будем искать решения в виде $T(x, t) = T(x - vt)$, где v — скорость движения фронта. Переходя к новой переменной $f = x - vt$ получим

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - v \rho C(T) \frac{\partial T}{\partial f} = \frac{\alpha}{h} (T - T_{\text{ВН}}) - \sigma(T)E^2. \quad (3)$$

Решение, отвечающее сосуществованию двух фаз, т. е. $v = 0$, возможно только при пороговом поле

$$E_{\text{пор}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{h(\sigma_{\text{П}} + \sigma_{\text{М}})} (T_0 - T_{\text{ВН}})}. \quad (4)$$

Для случая $\left| \frac{E - E_{\text{пор}}}{E_{\text{пор}}} \right| \ll 1$ и $C_1(T_M - T_{\text{П}}) \ll q_0$ выражение для скорости имеет следующий вид:

$$v = \frac{1}{\rho q_0} \sqrt{\frac{\kappa h^3}{\alpha^3}} (T_0 - T_{\text{П}}^{\circ}) (\sigma_M^2 - \sigma_{\text{П}}^2) E_{\text{пор}}^3 (E - E_{\text{пор}}), \quad (5)$$

где $T_{\text{П}}^{\circ}$ — стационарная температура, соответствующая полупроводниковой фазе, при $E = E_{\text{пор}}$.

Из формулы (5) видно, что при $E > E_{\text{пор}}$ v положительна и соответствует распространению металлической фазы, а при $E < E_{\text{пор}}$ меняет знак и соответствует распространению полупроводниковой фазы. Кроме того, видно, что наличие теплоты ФП приводит к эффективному уменьшению скорости движения границы раздела. Отметим, что нелинейная волна существует лишь в интервале $E_1 < E < E_2$ (см. рис. 2). Экспериментально исследовались пленки VO_2 на слюде, в которых наблюдался при 68°C ФППМ со скачком проводимости на три порядка. Толщина пленок составляла $0,1 \div 0,5$ мкм, толщина подложки $30 - 50$ мкм. На пленку VO_2 наносились на расстоянии $0,5 \div 1$ см друг от друга полоски алюминиевых электродов. На электроды подавалось постоянное напряжение от источника тока Б1-11. Эксперимент проводился при комнатных условиях. Напряжение на образце выбиралось таким образом, чтобы ток, проходящий через полупроводниковую фазу, не разогревал образец до температуры ФП и менялось от 6 до 15 В. Если участок пленки между электродами разогревался внешним воздействием до температуры ФП так, чтобы область металлической фазы замыкала электроды, то, начиная с напряжений $E > E_{\text{пор}}$ тепловой фронт, являющийся границей раздела фаз, двигался в сторону полупроводниковой фазы с постоянной скоростью составлявшей несколько мм/сек и возрастающей при росте напряжения. Изменение оптических свойств в видимом диапазоне при ФППМ позволяет визуально наблюдать движение температурной волны (см. рис. 3).

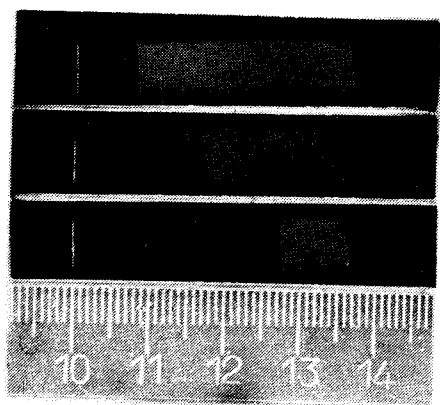


Рис. 3. Движение температурной волны в пленке VO_2 . Темная область соответствует металлической фазе. Снимки сделаны с интервалом 2 сек

В заключение отметим следующее: 1) экспериментально наблюдавшееся движение межфазной границы в пленке VO_2 согласуется с изложенной теорией движения нелинейной температурной волны; 2) особенность развития неустойчивости в полупроводниках с S-образной ВАХ проявляется в том, что однородные состояния устойчивы относительно малых возмущений и для возникновения нелинейной волны необходимо достаточно сильное пространственно-неоднородное возмущение; 3) так как фазовый переход полупроводник – металл сопровождается изменением оптических свойств, то нелинейные волны в среде с ФППМ представляют интерес для создания пространственно-временных модуляторов электромагнитного излучения.

Авторы благодарят С.Л.Зиглина за полезные обсуждения.

Институт радиотехники
и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
13 апреля 1979 г.

Литература

- [1] А.Л.Захаров. ЖЭТФ, **38**, 665, 1960.
 - [2] J. V. Gunn. Proc. Int. Conf. Phys. of Semicond. Paris, 1964, стр. 199.
 - [3] А.Ф.Волков, Ш.М.Коган. УФН, **96**, 633, 1968.
 - [4] Л.В.Келдыш. Вестник МГУ, сер. Физ., астроном., **19**, 86, 1978.
 - [5] В.Г.Дресвянников, О.И.Фисун. ЖЭТФ, **75**, 2141, 1978.
-