

МЕТОД АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СИЛЬНОСВЯЗАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

В.А. МАКСИМЕНКО^{1,2}, А.А. КОРОНОВСКИЙ^{1,2}, О.И. МОСКАЛЕНКО^{1,2},
А.Е. ХРАМОВ^{1,2}, К.Н. АЛЕКСЕЕВ³, А.Г. БАЛАНОВ³.

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия
maximenkovl@gmail.com

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия

³Университет города Лафборо
LE11 3TU, Лафборо, Великобритания

В работе предложен метод анализа устойчивости стационарного состояния сильносвязанной полупроводниковой сверхрешетки, позволяющий рассчитывать значение напряжения, необходимого для возникновения неустойчивости и находить частоту возникающих колебаний.

Ключевые слова: полупроводниковая сверхрешетка, пространственно-временная неустойчивость, домены, сверхвысокочастотная генерация.

В настоящее время большое внимание уделяется научным исследованиям, связанным с использованием полупроводниковых структур с периодическим потенциалом (сверхрешеток) для генерации [1] и усиления [2] сигналов сверхвысоких частот. В данном контексте особый интерес представляют сильносвязанные полупроводниковые сверхрешетки, транспорт заряда в которых осуществляется, в основном, за счет туннелирования электронов через потенциальные барьеры в пределах одной энергетической минизоны. Известно, что в подобных системах при приложении электрического поля электроны могут совершать Блоховские колебания с частотой до нескольких ТГц [3]. Необходимым условием реализации такого излучения является наличие пространственно однородного распределения электрического поля. На практике реализация такого распределения проблематична в силу того, что приложенное электрическое поле приводит к развитию пространственно-временной неустойчивости и образованию областей повышенной концентрации носителей заряда (доменов), дрейфующих вдоль полупроводниковой структуры [4]. Данный эффект не позволяет получить когерентное Блоховское излучение, однако, частота следования доменов заряда может достигать нескольких сотен гигагерц [5], и это явление можно также использовать для создания приборов СВЧ электроники. Очевидно, что анализ устойчивости стационарного распределения электрического поля в сверхрешетке наряду с фундаментальным интересом имеет большое значение для практических задач, связанных как с реализацией Блоховского осциллятора, так и с созданием генераторов на основе доменного транспорта.

В настоящей работе проводится анализ устойчивости сильносвязанной полупроводниковой сверхрешетки, моделируемой в рамках полуклассического подхода. Коллективная динамика носителей заряда в данном случае описывается с помощью самосогласованной системы дифференциальных уравнений, включающей уравнение непрерывности (1) и уравнение Пуассона (2)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\beta \frac{\partial}{\partial x} [\partial(n \times \mathfrak{D}_d(F))] \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = v(n-1), \quad (2)$$

где $n(x, t)$ и $F(x, t)$ – безразмерная объемная плотность носителей заряда и напряженность электрического поля, x и t – безразмерные координата и время, v и β играют роль управляющих параметров. Зависимость $\mathfrak{D}_d(F)$ определяет дрейфовую скорость электронов в первой энергетической минизоне с учетом рассеяния носителей заряда

$$\mathfrak{D}_d(F) = \frac{F}{1+F^2}. \quad (3)$$

Уравнения (1) – (3) дополняются граничными условиями, характеризующими постоянное падение напряжения на образце и свойства эмитирующей области (в данном случае рассматривается омический закон)

$$U_{SL} = \int_0^1 F(x) dx, \quad J(0, t) = sF(0, t). \quad (4)$$

Для анализа устойчивости вводится в рассмотрение возмущенное состояние системы $\tilde{n}(x, t) = n_0(x) + \tilde{n}(x) \times e^{\sigma t}$, $\tilde{F}(x, t) = F_0(x) + \tilde{F}(x) \times e^{\sigma t}$, где $\sigma = \lambda + i\omega$. При этом поведение малых возмущений относительно стационарного состояния системы описывается при помощи уравнений (1) – (4), линеаризованных в его окрестности. Данный подход позволяет при заданном напряжении U_{SL} находить пространственные распределения $\tilde{n}(x)$ всех возмущений, реализующихся в системе, и соответствующие им коэффициенты распространения σ .

В настоящей работе описанный выше подход был применен для полупроводниковой сверхрешетки GaAs-AlGaAs с периодом $d'=8.3$ нм и длиной $L'=115.2$ нм. Значения управляющих параметров были выбраны $v=15.769$ и $\beta=0.03$ согласно экспериментальной работе [6]. Было показано, что потеря устойчивости связана с появлением в системе возмущения, характеризующегося положительным значением коэффициента нарастания λ . Кроме того, была обнаружена связь между частотой возникающих колебаний тока, текущего через сверхрешетку, и частотой ω колебаний данного возмущения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-33071) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2).

Список литературы

1. Greenaway M.T. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80. P. 205318.
2. Timo Hyart et. al. // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 103. P. 117401.
3. Esaki L. and Tsu R. // IBM J. Res. Develop. 1970. Vol. 14. No. 1. P. 61.
4. Büttiker M. and Thomas H. // Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 38. No. 2. P. 78-80.
5. Schomburg E. et. al. // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. No. 15. P. 2179-2181.
6. Fromhold T.M. et. al. // Nature. 2004. Vol. 428. P. 726.