

УДК 621.315.592

**К.И. РУСАКОВ, В.В. ПАРАЩУК****МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТРИМЕРНЫХ РАЗРЯДОВ  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ**

В работах [1; 2] выдвинута и качественно обоснована идея о самоорганизации стримеров, получившая дальнейшее развитие в исследованиях процессов взаимодействия электромагнитных волн [3–5] и самовоздействия излучения в сильных электрических полях [6–9]. В связи со сложностью рассматриваемых явлений приобретает актуальность их численного моделирования [10–12]. Согласно [1] процесс самоорганизации в существенно нелинейной стримерной среде предполагает многообразие явлений взаимодействия между неравновесными носителями заряда, фотонами, фононами, электрическим полем и т. д., в том числе образование в такой сложной системе пространственно неоднородных диссипативных структур (ДС) и установление автоколебаний (АК) как важнейшего режима поведения нелинейной системы. Возможность АК в условиях, близких к условиям стримерных разрядов, исследовалась ранее без учета излучательных процессов или только для случая спонтанной рекомбинации без детального анализа вероятных режимов. Пространственно-временная картина развития стримера и роль стимулированной рекомбинации при этом не изучены.

В основу исследуемой модели положено взаимодействие в кристалле электронов, фотонов и сильного электрического поля, образующих трехкомпонентную систему, поведение которой в рамках пространственно-временной динамики может быть описано уравнениями

$$\partial n / \partial t = W + 1/e \operatorname{div} \mathbf{j}_e - \delta n / \tau - \eta (n - n_{\text{inv}}) n_f, \quad (1)$$

$$\partial n_f / \partial t = - n_f / \tau_f + \eta (n - n_{\text{inv}}) n_f, \quad (2)$$

$$\partial / \partial t \operatorname{div} \mathbf{E} = \partial / \partial t \operatorname{div} \mathbf{E}' - 1/\tau_m \operatorname{div} \mathbf{E}. \quad (3)$$

Здесь (1) – кинетическое уравнение для концентрации неравновесных носителей заряда  $n$ , (2) – уравнение для плотности фотонов  $n_f$ , (3) – уравнение для напряженности электрического поля в кристалле  $\mathbf{E}$  ( $\mathbf{E}'$  – внешнее поле);  $W$  – скорость генерации носителей вследствие ударной ионизации,  $\mathbf{j}_e$  – плотность тока,  $\tau$  и  $\tau_f$  – времена жизни электронов проводимости и фотонов соответственно,  $\eta$  – удельный коэффициент усиления,  $n_{\text{inv}}$  – концентрация на пороге инверсии,  $\tau_m = \tau_m(n)$  – максвелловское время релаксации. Система (1)–(3) анализировалась численно в приближении линейной аппроксимации внешнего поля в одномерном случае и в пренебрежении диффузией и дрейфом носителей с начальными и граничными условиями

$t = 0, n = n_0, n_f = n_{f0}, E = E_0, x = 0, \partial E / \partial t = 0, A_0 = \partial E' / \partial t = 0$ . Использовались безразмерные величины  $n/n_1, n_f/n_1, n_{inv}/n_1, E/E_1, t/t_1, T/\tau_0, \tau/\tau_0, \tau_f/\tau_0, x/x_1, A_0/A$ , начальные данные  $n_0 = 0 \div 10^2, n_{f0} = 10^{-18} \div 10^2, E_0 = 10^{-6} \div 10^2$ ; нормировочные параметры  $n_1 = 10^{18} \text{ см}^{-3}, E_1 = 10^6 \text{ В/см}, t_1 = 10^{-13} \text{ с}, \tau_0 = 10^{-12} \text{ с}, x_1 = 10^{-4} \text{ см}, A = 10^{18} \text{ В/(см}\cdot\text{с)}$  и типичные значения физических величин для широкозонных полупроводников.

Вначале целесообразно исследовать условия возникновения автоколебательных режимов в простейшем случае – для электронов и поля с учетом спонтанной рекомбинации в области возбуждения. Решения системы (1)–(3), соответствующие сформулированной задаче, получены в виде зависимости  $E(n)$  в широком временном диапазоне – до нескольких наносекунд (рисунок 1а). Изучено влияние на решения времени жизни неравновесных носителей и скорости роста внешнего поля ( $A_0$ ). С увеличением скорости  $A_0$  или времени жизни в определенных диапазонах возможен переход от периодического режима (или слабозатухающих) колебаний поля и концентрации носителей к режиму затухающих колебаний, сопровождающийся вначале ростом стационарного значения концентрации, а затем ее резким падением. Такое поведение системы объясняется установлением автоколебаний единой синхронной частоты и согласуется с известными представлениями.

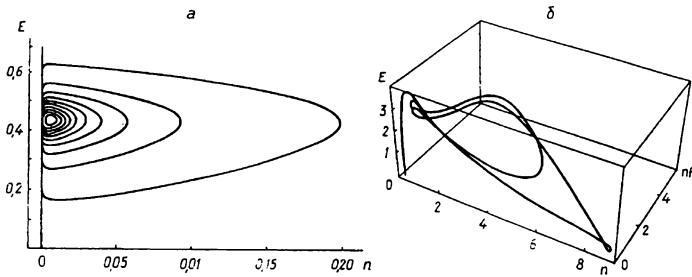


Рисунок 1 – Автоколебания электрон-фотонной системы в условиях спонтанной (а) и стимулированной (б) рекомбинации.

$A_0 = 10^{-3}$  (а), 1 (б);  $\tau = 10$  (а),  $n_{inv} = 10^{-2}$ ;  $t \rightarrow 3 \cdot 10^4$  (а),  $2 \cdot 10^3$  (б);  $\tau_f = 1$  (б).

Анализ решений полной системы уравнений (1)–(3) (случай стимулированной рекомбинации) в зависимости от параметров задачи  $A_0, n_{inv}, \eta, \tau_f$  и др. представлен на рисунке 2 в виде  $E(n, n_f)$  (рисунок 1б) и  $E(t, x), n(t, x), n_f(t, x)$ . Установлено, что при  $n_{inv} \cong 0,01, \eta \cong 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}, A_0 = 1 \div 10, \tau_f \cong 1$  в указанной системе возникают устойчивые периодические колебания (режим регулярных пульсаций) электрического поля, концентрации неравновесных

носителей и плотности фотонов. При этом концентрация носителей и плотность фотонов достигают максимальных значений  $n = 5 \div 30$ ,  $n_f = 3 \div 10$ , а чувствительность системы к значению удельного коэффициента усиления  $\eta$  коррелирует с одним из основных условий возбуждения стримера – необходимости определенной квантовой эффективности среды [1; 2].

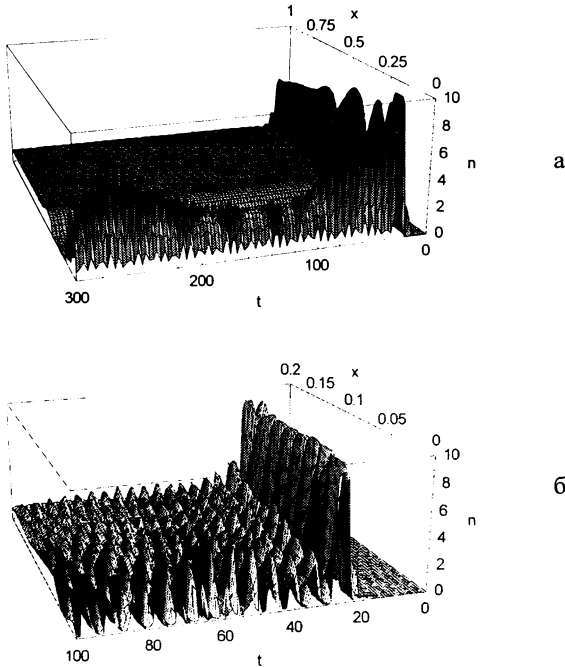


Рисунок 2 – Пространственно-временная динамика системы (концентрации неравновесных носителей, плотности фотонов и электрического поля) и формирование регулярных (а,б) режимов ( $A_0 = 1$ ,  $n_{inv} = 10^{-2}$ ,  $\tau_f = 1$ ,  $\eta = 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ;  $n_0 = 10^{-3}$ ,  $n_{f0} = 10^{-3}$ ,  $E_0 = 10^{-1}$ )

Варьирование начальных условий в широких пределах не влияет на параметры установившихся автоколебаний. Наличие в этом случае пространственной неоднородности решений (рисунок 2) указывает на образование диссипативных структур в форме бегущего импульса или фронта. При этом зависимость решений от скорости нарастания внешнего поля носит немонотонный характер и имеют место осцилляции скорости движения ДС. Характерный размер области неоднородности близок к параметрам канала стримера.

Установление в нелинейной системе режима периодических колебаний соответствует оптимальным условиям возбуждения стримерных разрядов и может рассматриваться как один из источников интенсивных СВЧ волн, участвующих в их развитии. Автоколебательный режим или режим регулярных пульсаций обуславливает малую длительность генерируемых СВЧ-импульсов тока ( $\sim 10^{-11}$  с) и тем самым уменьшает (исключает) роль разогрева решетки кристалла в формировании стримера. Данный режим объясняет также прерывистую структуру разрядного канала.

В случае вынужденной рекомбинации (генерации света) усиливается взаимодействие структур. Их развитие, характеризующееся переходом от хаоса к АК и ДС (рисунок 2), напоминает процесс формирования стримера. В рамках представления о влиянии внешних воздействий на поведение ДС находит объяснение эффект оптического гашения стримера. Анализ закономерностей взаимодействия стримерных разрядов в полупроводниках при различных условиях позволяет заключить, что при высоких уровнях возбуждения указанные разряды ведут себя как диссипативные структуры, а при средних уровнях – подобно структурам в нелинейной консервативной среде (солитонам), т. е. объединяют в себе свойства обеих структур и в этом смысле можно говорить о большей степени их самоорганизации [1].

С целью сравнения вклада различных механизмов размножения неравновесных носителей в формирование автоколебательных режимов исследованы решения электрон-фотонной системы в условиях туннельного эффекта, ударной- и фотоионизации. В случае фотоионизации при одинаковых условиях – крутизне фронта возбуждающего импульса, скорости рекомбинации и др. – достигаемая концентрация неравновесных носителей и плотность фотонов примерно на порядок выше, чем для туннельного эффекта и в 1,5–2 раза превышают соответствующие значения для ударной ионизации. При этом поля, требуемые для получения равной концентрации, существенно ниже, что говорит о преобладающем вкладе излучательных процессов в указанном режиме.

Таким образом, в системе, моделирующей поведение стримера в полупроводнике, формируется широкий спектр динамических режимов – от хаоса до различных АК режимов и пространственно-неоднородных ДС, являющихся элементами самоорганизации. Сравнение эффективности вероятных механизмов генерации неравновесных носителей указывает, в отличие от существующих оценок, на преобладающий вклад в этих условиях излучательного процесса в согласии с выводами работы [13]. Автоколебательный режим совместно с эффектом автоканалирования света [11] обуславливают отсутствие разрушений в канале стримера, что является одним из его ценных практических свойств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибковский, В.П. Стримеры в полупроводниках – кооперативные самоорганизованные процессы / В.П. Грибковский // Докл. АН БССР. – 1985. – Т. 29, № 10. – С. 896–898.
2. Грибковский, В.П. Полупроводниковые лазеры / В.П. Грибковский. – Минск : Университетское, 1988. – С. 235–264.
3. Грибковский, В.П. Взаимодействие электрического поля со светом и направленность стримерных разрядов / В.П. Грибковский, А.Н. Прокопеня, К.И. Русаков, В.В. Парашук // ЖПС. – 1994. – Т. 60, № 3-4. – С. 362–368.
4. Грибковский, В.П. О кристаллографической ориентации стримерных разрядов / В.П. Грибковский, В.В. Парашук, К.И. Русаков // ЖТФ. – 1994. – Т. 64, № 11. – С. 169–171.
5. Грибковский, В.П. Стримерный лазер с селективным возбуждением / В.П. Грибковский, В.В. Парашук, А.Н. Прокопеня, К.И. Русаков // Изв. Российской АН. Сер. Физическая. – 1995. – Т. 59, № 6. – С. 30–33.
6. Парашук, В.В. Излучательные процессы при разряде в полупроводниках / В.В. Парашук, В.П. Грибковский, К.И. Русаков, А.Н. Прокопеня // Докл. АН Беларуси. – 1997. – Т. 41, № 3. – С. 43–47.
7. Русаков, К.И. Излучательные процессы при неполном электрическом пробое в диэлектриках и электрооптических кристаллах / К.И. Русаков, В.В. Парашук // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Физика, математика, химия. – 2002, № 5. – С. 20–23.
8. Парашук, В.В. Взаимодействие СВЧ волн со светом и нелинейные оптические процессы в полупроводниках в сильном электрическом поле / В.В. Парашук, В.П. Грибковский, К.И. Русаков, А.Н. Прокопеня. – Минск, 1997. – 26 с. – (Препринт / Акад. наук Беларуси. Ин-т физики ; № 709).
9. Парашук, В.В. Об автоканализации света при стримерном разряде в полупроводниках / В.В. Парашук, В.П. Грибковский // Докл. АН Беларуси. – 1997. – Т. 41, № 1. – С. 44–49.
10. Парашук, В.В. Самоканализация света при стримерном разряде в полупроводниках / В.В. Парашук, В.П. Грибковский, К.И. Русаков // Lietuvos fizikos žurnalas. – 1997. – Vol. 37, № 4. – P. 343–347.
11. Парашук, В.В. Нелинейнооптические и акустоэлектронные процессы в кристаллах сульфида кадмия / В.В. Парашук. – Минск, 2001. – 27 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Ин-т физики; № 735).
12. Парашук, В.В. Автоканализация света в полупроводниках с кубической и пятого порядка нелинейностями / В.В. Парашук, К.И. Русаков // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Физика, математика, химия. – 2001. – № 5. – С. 14–21.
13. Парашук, В.В. О механизме генерации неравновесных носителей при стримерном разряде в полупроводниках / В.В. Парашук, К.И. Русаков // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Физика, математика, химия. – 2003. – № 5. – С. 5–7.