

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(5)

Краткое сообщение
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003064
EDN: ZQFLQI

Самоорганизационная динамика концентрации носителей зарядов в полупроводниках при их инжекции

М. В. Елисов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Россия

E-mail: maksimelisov2003@gmail.com

Поступила в редакцию 2.06.2023, принята к публикации 28.08.2023,

опубликована онлайн 15.09.2023, опубликована 29.09.2023

Аннотация. Цель настоящей работы — исследовать явление самоорганизации динамики концентрации носителей зарядов в полупроводниковых структурах. Исследовать основную модель, дать численную оценку при заданных параметрах и предложить её модификацию. Определить зависимость результатов оценки от управляющего параметра. Рассмотреть динамику при зависимости управляющего параметра от времени. Провести теоретический анализ, численное моделирование и построить графики. **Методы.** В данной работе исследуются возможности и ограничения основной модели генерационно-рекомбинационной динамики в полупроводниках, предложенной ранее другими исследователями. Была предложена и рассмотрена модификация основной модели. **Результаты.** Продемонстрированы различные виды динамики концентрации носителей зарядов. Был проведён теоретический анализ модели. Численное моделирование показало, что при определённых значениях управляющего параметра наблюдаются устойчивые состояния. Были получены численные оценки управляющего параметра, построены фазовые портреты нелинейного уравнения и рассмотрено поведение динамической системы при периодичности управляющего параметра. Расширенная модель показала качественно новое поведение в сравнении с базовой. **Заключение.** Показано, что в полупроводниковых структурах динамика зарядов может демонстрировать различные поведения. Полученные закономерности и оценки согласуются с получаемыми ранее. Полученные результаты могут быть проверены экспериментально и будут полезны при разработке фото- и бета-вольтаических устройств.

Ключевые слова: полупроводники, самоорганизация, нелинейность, нелинейные системы, фазовые портреты, фото- и бета-вольтаические генераторы.

Для цитирования: Елисов М. В. Самоорганизационная динамика концентрации носителей зарядов в полупроводниках при их инжекции // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 5. С. 622–627. DOI: 10.18500/0869-6632-003064. EDN: ZQFLQI

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Self-organization dynamics of charge carrier concentration in semiconductors due to the charge injection

M. V. Elisov

Samara University, Russia

E-mail: maksimelisov2003@gmail.com

Received 2.06.2023, accepted 28.08.2023, available online 15.09.2023, published 29.09.2023

Abstract. The *purpose* of this study is to investigate the phenomenon of self-organization of the dynamics of charge carriers in semiconductor structures. Investigate the basic model, give a numerical estimate for given parameters and propose its modification. Determine the dependence of the evaluation results on the control parameter. Consider the dynamics when the control parameter depends on time. Carry out theoretical analysis, numerical simulation and build graphs. *Methods.* In this paper, we investigate the possibilities and limitations of the basic model of generation-recombination dynamics in semiconductors, proposed earlier by other researchers. A modification of this model was proposed and considered. *Results.* Various types of charge carrier concentration dynamics are demonstrated. Theoretical analysis of the model was carried out. Numerical simulation has shown that for certain values of the control parameter, stable states are observed. Numerical estimates of the control parameter were obtained, phase portraits of the nonlinear equation were constructed, and the behavior of the dynamical system was considered when the control parameter is periodic. The extended model showed a qualitatively new behavior in comparison with the basic one. *Conclusion.* It is shown that charge dynamics in semiconductor structures can exhibit different behaviors. The patterns and estimates obtained are consistent with those obtained earlier. The results obtained can be verified experimentally and will be useful in the development of photo- and beta-voltaic devices.

Keywords: semiconductors, self-organization, nonlinearity, nonlinear systems, phase portraits, photo- and beta-voltaic generators.

For citation: Elisov MV. Self-organization dynamics of charge carrier concentration in semiconductors due to the charge injection. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(5):622–627. DOI: 10.18500/0869-6632-003064

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Полупроводниковый кристалл представляет сложную систему, в которой наблюдаются электрические неустойчивости, такие как срыв тока, переключение между проводящим и непроводящим состояниями или спонтанные колебания тока или напряжения. Подобные явления возникают при переводе полупроводника в неравновесное состояние.

В данной работе исследуются характеры динамики носителей зарядов в полупроводниковых структурах при внешней инжекции. В качестве внешнего воздействия могут выступать, например, фотоны (фотоэлемент), бета-частицы (бета-элемент) [1]. Используемая модель рассматривалась раньше [2–4], но в недостаточной мере. Предыдущие исследователи не изучали модель в случае зависимости управляющего параметра от времени. Также в одном из исследований [4] рассматривалась динамика в полупроводниках, но в условиях воздействия сильного магнитного поля, а коэффициент ударной ионизации рассматривался как константа.

Результаты исследования подобных моделей применимы, в частности, для моделирования фото- и бета-вольтаических устройств. В дальнейшем возможен учёт дополнительных параметров для расширения модели.

Цель настоящего исследования — определить стабильные состояния, а также проверить зависимость результатов оценки концентрации носителей зарядов от параметров: коэффициента ударной ионизации, рекомбинации, концентрации доноров и акцепторов. Рассмотреть динамику в условиях периодической зависимости управляющего параметра.

1. Методика

1.1. Базовое кинетические уравнение. Рассмотрим базовую модель динамики электронов в неравновесном полупроводнике. Она была предложена в работе [3] и рассмотрена в [5]. В ней авторы пренебрегают тепловой ионизацией ловушек и Оже-рекомбинацией, что отвечает полупроводнику в условиях низких температур. Пренебрежение Оже-рекомбинацией мотивировано тем, что это ведёт к упрощению модели. Учёт этого процесса качественно не влияет на модель [3]. В кристаллической решетке полупроводника находятся различные дефекты и примеси, создающие локальные энергетические уровни в запрещенной зоне, поэтому главным процессом рекомбинации является рекомбинация через ловушки. Поверхность полупроводника считается идеальной, следовательно, поверхностная рекомбинация также не учитывается.

$$\frac{dn}{dt} = n[XN_D - T_r(N_t - N_D) - n(X + T_r)], \quad (1)$$

где T_r — константа скорости рекомбинации зона-ловушка, X — коэффициент ударной ионизации, N_D — концентрация доноров, N_t — концентрация ловушек, n — концентрация носителей зарядов, в данном случае электронов. X является управляющим параметром и от него зависит характер фазового портрета и поведение системы.

Критическое значение управляющего параметра:

$$X_{\text{crit}} = (N_t/N_D - 1)T_r.$$

Уравнение всегда имеет решение $n = 0$ (рис. 1), которое устойчиво при $X < X_{\text{crit}}$. При $X > X_{\text{crit}}$ в положительной полуплоскости возникает устойчивое решение (рис. 2).

$$n = \frac{XN_D - T_r(N_t - N_D)}{X + T_r}.$$

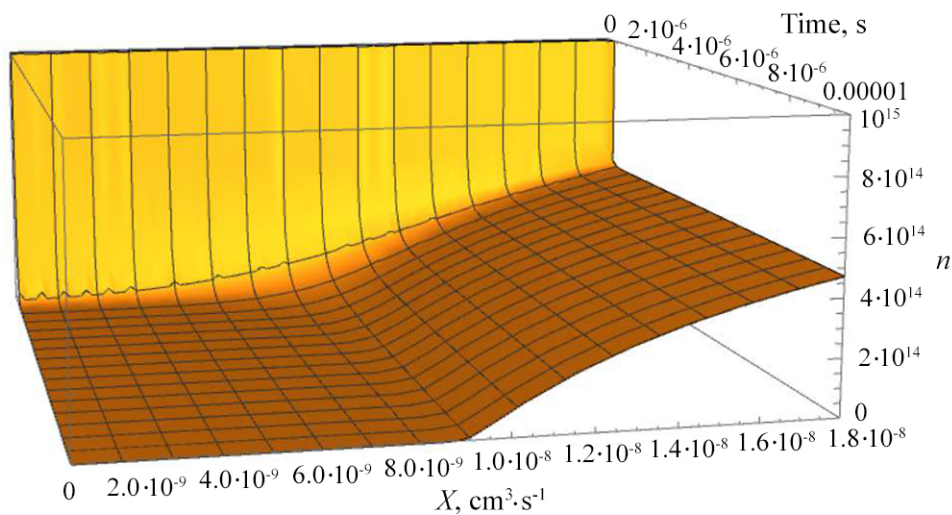


Рис. 1. Зависимость стационарной концентрации электронов n от коэффициента ударной ионизации X (цвет онлайн)

Fig. 1. Dependence of the stationary electron concentration n on the impact ionization coefficient X (color online)

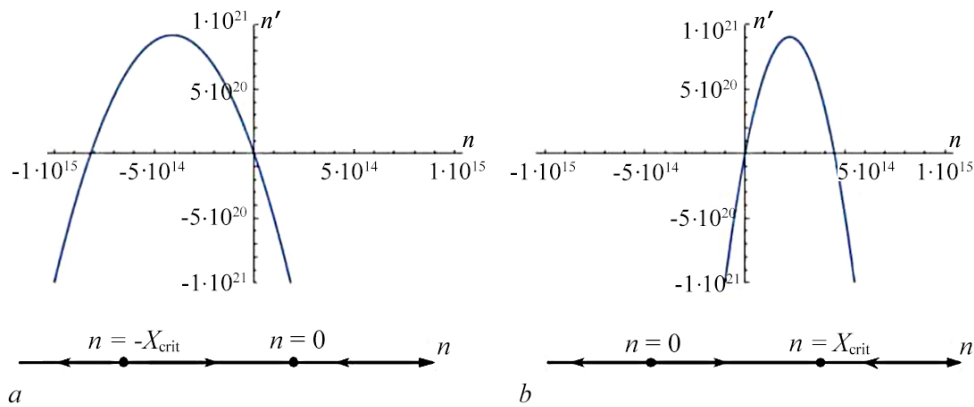


Рис. 2. Фазовые портреты уравнения (1) при $X = 0.5X_{crit}$ (a), $X = 1.9X_{crit}$ (b)

Fig. 2. Phase portraits of the equation (1) for $X = 0.5X_{crit}$ (a), $X = 1.9X_{crit}$ (b)

На рис. 1 изображена зависимость концентрации электронов от X , меняющегося непрерывно от 0 до $2X_{crit}$, что позволяет наблюдать изменение поведения системы при достижении управляющим параметром критического значения. В этом случае равновесная концентрация становится отличной от нуля.

На рис. 2 изображены одномерные фазовые портреты уравнения (1) при разных значениях управляющего параметра. Происходит транскритическая бифуркация, при которой ранее лежавшее в нефизической области (рис. 2, a) пространства решение переходит в физическую область (рис. 2, b). То есть происходит неравновесный фазовый переход второго рода из непроводящего состояния в проводящее.

При численном моделировании были использованы следующие значения: $T_r = 10^{-9} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что характерно для кремния при глубине ловушек 0.54 эВ ниже зоны проводимости [3]. Тогда $X_{crit} = 9 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$.

1.2. Дополненная модель с функцией $X(t)$. Ранее управляющий параметр X рассматривался как независимая от времени константа, теперь рассмотрим случай его функциональной зависимости от времени t . Коэффициент ударной ионизации X сильно связан со значением приложенного электрического поля E , поэтому на практике функциональная задача X осуществляется через управление E [6]. В данной работе в качестве функции $X(t)$ предлагается следующее выражение:

$$X(t) = X_1 \left(0.5 - 0.5 \sin \left(10^7 \pi t + \frac{\pi}{2} \right) \right) + X_2, \quad (2)$$

где X_1 — отвечает за периодическую часть функции, а X_2 — за независимую от времени стационарную часть. При этом $10^7 \pi$ — угловая частота колебаний, а $\pi/2$ — начальная фаза. Вид зависимости от времени мотивирован желанием рассмотреть модель в условиях гармонических колебаний. Величина коэффициента 10^7 , являющегося частотой, объясняется тем, что переход к равновесному состоянию происходит за микросекунды, и при небольшой частоте изменения $X(t)$ вклад осцилляций будет крайне мал.

При моделировании хорошо проявляется эффект периодичности (рис. 3). Зелёная полоса — верхняя ограничивающая линия, соответствующая $X_1 + X_2$. Оранжевая полоса — нижняя ограничивающая линия, соответствующая X_2 . В случае, когда стационарная часть равна нулю, а периодическая меньше X_{crit} (рис. 3, a), наблюдается общий тренд на уменьшение концентрации до нуля. Если $X_1 + X_2 = X_{crit}$ (рис. 3, b), то верхняя линия ограничения стремится к устойчивому состоянию, а нижняя — к нулю. То есть за период колебаний система успевает от непроводящего

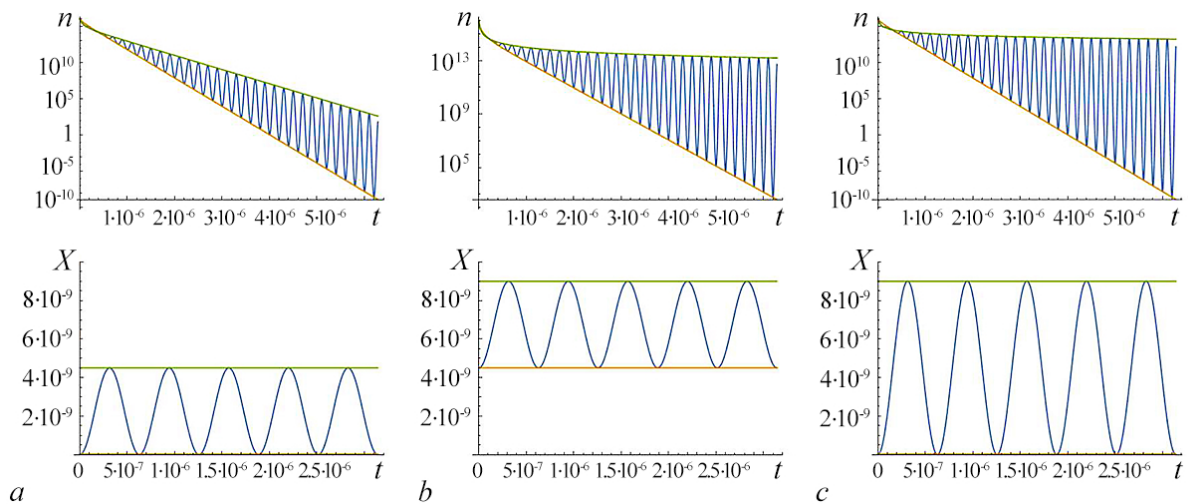


Рис. 3. Сверху — полулогарифмические графики зависимости концентрации n от времени t , внизу — зависимость коэффициента ударной ионизации X от времени t при $X_1 = 0.5X_{crit}, X_2 = 0$ (a), $X_1 = 0.5X_{crit}, X_2 = 0.5X_{crit}$ (b), $X_1 = 1.001X_{crit}, X_2 = 0$ (c)

Fig. 3 Above — semi-logarithmic graphs of the dependence of concentration n on time t , below — impact ionization coefficient $X(t)$ for $X_1 = 0.5X_{crit}, X_2 = 0$ (a), $X_1 = 0.5X_{crit}, X_2 = 0.5X_{crit}$ (b), $X_1 = 1.001X_{crit}, X_2 = 0$ (c)

состояния $n = 0$ дойти до проводящего стационарного состояния. Если $X_1 = X_{crit}$, а $X_2 = 0$ (рис. 3, c), то общее поведение будет схожим со вторым случаем, но время для достижения верхней линии тренда линии стационарного состояния будет больше.

2. Результаты

Был построен график стационарной концентрации электронов от коэффициента ударной ионизации. Проанализировано уравнение (1) основной модели и построены фазовые портреты. Была предложена расширенная модель (2), по которой также были построены графики. Полученные расширенным методом динамики рис. 3 хорошо соотносятся с результатами основной модели рис. 1, при этом имея качественные особенности.

Заключение

Данная модель позволяет рассмотреть различные динамики концентрации. Несмотря на простоту, её анализ даёт достойные к рассмотрению результаты. Также при тех значениях частоты, которые были рассмотрены, метод везде показывал достаточную чувствительность к значению X .

В дальнейшем планируется расширить модель, учесть такие эффекты, как Оже-рекомбинация, тепловая ионизация, влияние дефектов кристаллической решётки и пр., что позволит расширить применимость модели на больший спектр реальных структур и сравнить теоретические данные с экспериментальными.

Также планируется использовать результаты при моделировании фото- и бета-вольтаических устройств [1].

В результате можно сформулировать следующие преимущества метода.

- Простота анализа.
- Широкая возможность модифицирования. Возможность учитывать дополнительные эффекты.
- Возможность экспериментальной проверки.

Список литературы

1. Долгополов М. В., Елисов М. В., Раджапов С. А., Чипура А. С. Модели масштабирования электрических свойств фото- и бета-преобразователей с наногетеропереходами // *Computational Nanotechnology*. 2023. Т. 10, № 1. С. 138–146. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-1-138-146.
2. Качлишвили З. С., Кезерашвили И. Д. Динамический хаос в полупроводниках с горячими носителями // *Физика и техника полупроводников*. 1990. Т. 24, № 6. С. 1106–1109.
3. Шёлль Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами. М.: Мир, 1991. 464 с.
4. Джандиери К. М., Качлишвили З. С., Стрганов А. Б. Динамический хаос в частично освещенном компенсированном полупроводнике в условиях примесного электрического пробоя // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, № 6. С. 673–680.
5. Елисов М. В. Самоорганизационная динамика в полупроводниковых гетероструктурах при инжекции носителей зарядов // В сб.: *Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2023: материалы XXX Всероссийской научной конференции*. Т. 17. Саратов, 15–19 мая 2023 года. Саратов: Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, 2023. С. 130–131.
6. Грехов И. В., Зазулин С. В., Кардо-Сысоев А. Ф. Ударная ионизация в кремнии в слабых полях // *Физика и техника полупроводников*. 1991. Т. 25, № 5. С. 885–892.

References

1. Dolgoplov MV, Elisov MV, Rajapov SA, Chipura AS. Scaling models of electrical properties of photo- and beta- converters with nano-heterojunctions. *Computational Nanotechnology*. 2023; 10(1):138–146 (in Russian). DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-1-138-146.
2. Kachlishvili ZS, Kezerashvili ID. Dynamic chaos in semiconductors with hot carriers. *Soviet Physics. Semiconductors*. 1990;24(6):1106–1109 (in Russian).
3. Schöll E. Nonequilibrium Phase Transitions in Semiconductors: Self-Organization Induced by Generation and Recombination Processes. Berlin, Heidelberg: Springer; 1987. 313 p. DOI: 10.1007/978-3-642-71927-1.
4. Jandieri KM, Kachlishvili ZS, Stroganov AB. Dynamic chaos in a partially illuminated compensated semiconductor under the conditions of impurity-related breakdown. *Semiconductors*. 2005;39(6): 642–649. DOI: 10.1134/1.1944853.
5. Elisov MV. Self-organizational dynamics in semiconductor heterostructures upon injection of charge carriers. In: *Nonlinear Days in Saratov for Young People — 2023: Materials of the XXX All-Russian Scientific Conference*. Vol. 17. Saratov, May 15–19, 2023. Saratov: Saratov State University; 2023. P. 130–131 (in Russian).
6. Grekhov IV, Zazulin SV, Kardo-Sysoev AF. Impact ionization in silicon in weak fields. *Soviet Physics. Semiconductors*. 1991;25(5):885–892 (in Russian).



Елисов Максим Вячеславович — родился в Самаре (2003). Получает степень бакалавра по направлению «Физика» на кафедре «Общая и теоретическая физика» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева. Является постоянным участником научных конференций и семинаров. Научные интересы — нелинейная динамика, динамический хаос, математическое моделирование, моделирование полупроводниковых устройств, наноструктуры. Имеет несколько научных публикаций.

Россия, 443086 Самара, ул. Московское шоссе, 34
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева
E-mail: maksimelisov2003@gmail.ru
ORCID: 0009-0001-3097-2703
AuthorID (eLibrary.Ru): 1202766