

Быстродействующие преобразователи СВЧ-мощности на основе радиоэлектрического эффекта

А.В. Щербак, Л.В. Курганская, Д.Ю. Голубева

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Рассмотрены вопросы практического применения радиоэлектрического эффекта для измерения уровня проходящей непрерывной и импульсной СВЧ-мощности в прямоугольном волноводе. Проведен анализ влияния основных составляющих радиоэлектрического эффекта на коэффициент преобразования уровня СВЧ-мощности в напряжение. Предложены способы снижения объемной и контактной термоЭДС. Разработаны и изготовлены образцы полупроводниковых преобразователей СВЧ-мощности на основе радиоэлектрического эффекта. Исследована зависимость коэффициента преобразования от уровня СВЧ-мощности как для непрерывной, так и для импульсной СВЧ-мощности. Экспериментально установлено, что коэффициент преобразования не изменяется в диапазоне от 0 до 10 Вт непрерывной СВЧ-мощности и от 0 до 3000 Вт импульсной СВЧ-мощности при коэффициенте заполнения импульсов не более 0,08 %.

Ключевые слова: радиоэлектрический эффект, высокочастотный эффект Холла, преобразователь СВЧ-мощности, измерение СВЧ-мощности.

Одним из основных направлений полупроводниковой электроники и техники СВЧ является разработка измерителей мощности, работающих в диапазоне сантиметровых и миллиметровых длин волн. Принцип действия широко используемых для измерения СВЧ-мощности болометров и термисторов основан на преобразовании СВЧ-энергии в тепловую, что сводит задачу измерения СВЧ-мощности к измерению количества теплоты [1]. В силу инерционности тепловых процессов время установления теплового равновесия, а, следовательно, и время измерения уровня СВЧ-мощности достаточно велико (единицы мс и более). Это позволяет использовать подобные преобразователи лишь для измерения уровня непрерывной СВЧ-мощности или для измерения среднего значения мощности импульсно модулированного сигнала.

Использование радиоэлектрического эффекта, возникающего в полупроводниках на сверхвысоких частотах, для измерения уровня СВЧ-мощности позволяет осуществить прямое преобразование уровня СВЧ-мощности в электрический сигнал, минуя преобразование энергии электромагнитного поля в другие виды. Измерители мощности СВЧ-колебаний на основе радиоэлектрического эффекта имеют небольшие размеры (единицы мм), обладают низким уровнем

шумов, а также линейной зависимостью выходного сигнала от величины проходящей мощности.

Радиоэлектрический эффект

Идея измерения СВЧ-мощности с помощью эффекта Холла принадлежит Барлоу [2]. Известно, что при прохождении электрического тока через проводник и действии магнитного поля, перпендикулярного току, возникает электрическое поле (Холла) перпендикулярное току и магнитному полю. Причиной появления поля Холла является сила Лоренца, действующая на движущиеся заряды. Величина поля Холла пропорциональна произведению плотности протекающего тока и магнитной индукции. Аналогично, при распространении электромагнитной волны в слабопроводящей среде (полупроводнике) электрическое поле волны создает ток проводимости в этой среде, а магнитное поле волны, перпендикулярное этому току приводит к появлению эффекта Холла. Поле Холла в этом случае направлено параллельно направлению распространения волны. Величина ЭДС Холла пропорциональна произведению электрического и магнитного поля волны, то есть мощности волны.

Радиоэлектрический эффект заключается в возникновении постоянного напряжения или

тока в среде со свободными носителями заряда при прохождении через нее СВЧ-волны (см. рис. 1). Исследования, основанные на кинетическом подходе к взаимодействию свободных носителей заряда с полем плоской электромагнитной волны [3], показывают, что одним из механизмов появления постоянной ЭДС является передача импульса электромагнитной волны свободным носителям заряда. Другим механизмом является неоднородный разогрев среды вдоль направления распространения волны. В общем случае ЭДС радиоэлектрического эффекта (радиоэдс) представляет собой сумму электродвижущих сил различной природы:

$$V = V_{\parallel} + V_T + V_{TC} + \sum V_i. \quad (1)$$

Первое слагаемое V_{\parallel} – ЭДС Холла, значение которой прямо пропорционально уровню СВЧ-мощности. Это слагаемое и является полезным сигналом. Второе и третье слагаемые V_T – ЭДС неоднородного разогрева и V_{TC} – контактная термоЭДС, существенно зависят от внешних условий. Остальные слагаемые V_i соответствуют различным сопутствующим эффектам (эффект Эттингсгаузена и др.). Величины электродвижущих сил этих эффектов существенно ниже первых двух и их суммарный вклад в радиоэлектрический эффект пренебрежимо мал [4].

ЭДС Холла (ЭДС увлечения носителей заряда электромагнитной волной) выражается формулой [3]:

$$V_{\parallel} = -\frac{\alpha_{ЭЛ} W_0 (1 - e^{-\alpha L})}{\alpha e n v_{\phi}} \times \left\langle \frac{\omega^2 \tau^2 \left(1 + \frac{\alpha}{2k} \omega \tau\right)}{1 + \omega^2 \tau^2} \right\rangle \left\langle \omega \tau \left\langle \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right\rangle \right\rangle^{-1}. \quad (2)$$

Здесь W_0 – интенсивность падающей волны; $\alpha_{ЭЛ}$ – коэффициент затухания волны на свободных носителях заряда; α – коэффициент поглощения; n – концентрация носителей заряда; e – заряд электрона; v_{ϕ} – фазовая скорость электромагнитной волны в веществе; L – длина образца вдоль направления распространения волны; τ – время релаксации по импульсу; ω и k – частота и модуль волнового вектора электромагнитной волны. Угловые скобки означают усреднение по времени соответствующих выражений.

Так как время релаксации по импульсу для широко используемых полупроводников, таких

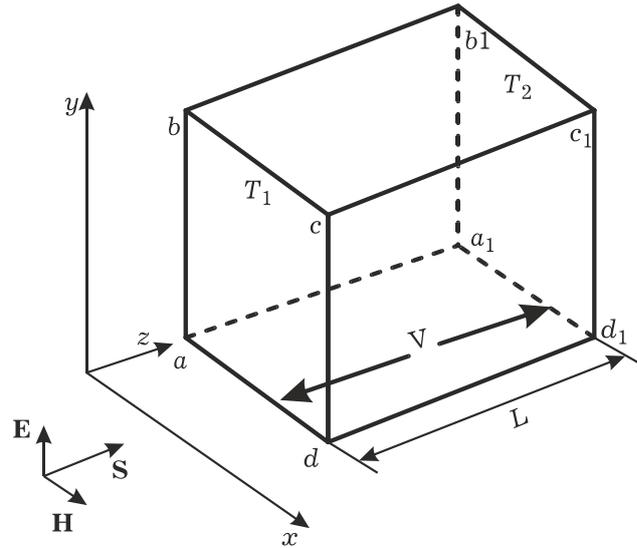


Рис. 1. Радиоэлектрический эффект

как кремний, германий, арсенид галлия и др. при комнатных температурах порядка 10^{-13} с, то для диапазона сверхвысоких частот (до сотен гигагерц) выполняется условие $\omega \tau \ll 1$, в результате чего (2) можно представить в виде:

$$V_{\parallel} = \frac{4\pi}{c^2} \mu_H W_0 \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}, \quad (3)$$

где μ_H – холловская подвижность носителей заряда.

Верхняя частота рабочего диапазона датчиков СВЧ-мощности на основе эффекта Холла ограничивается явлением инерции газа носителей заряда. Известно, что наличие токов или ЭДС в полупроводнике связано с неравновесной частью функции распределения носителей заряда, которая, в свою очередь, зависит от внешнего воздействия, в данном случае от электрического поля электромагнитной волны. Между колебаниями неравновесной части функции распределения и напряженности поля имеется сдвиг фаз, равный $\arctg(\omega \tau)$, происхождение которого связано с ограниченной скоростью реакции системы на изменение внешних условий. Электрическое поле ускоряет все носители заряда одинаковым образом, но на функции распределения это сказывается лишь в результате столкновений. Таким образом, проявление инерции носителей заряда в полупроводниках определяется их природой, наличием примесей, температурой.

ТермоЭДС в полупроводниках обусловленная градиентом температуры в образце выражается формулой [4]:

$$V_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_T dT, \quad (4)$$

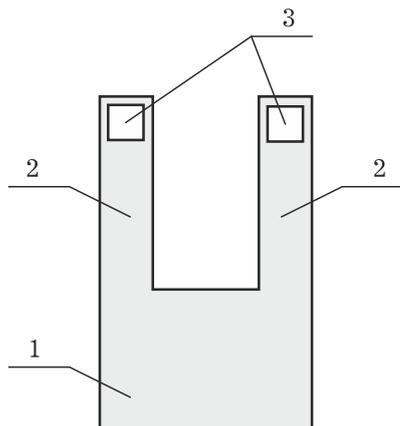


Рис. 2. Датчик Холла с удлиненными выводами: 1 - чувствительный элемент; 2 - удлиненные выводы; 3 - контактные площадки

где α_T - коэффициент термоЭДС полупроводника; T_1 и T_2 - температуры противоположных граней полупроводникового образца (см. рис. 1). Так как температуры граней образца могут варьироваться в широких пределах в зависимости от проходящей мощности, условий отвода тепла от преобразователя, то термоэлектрическая составляющая выходного сигнала преобразователя СВЧ-мощности приводит к погрешности измерений.

Контактная термоЭДС возникает в результате разности температур контактов преобразователя. Она также сильно зависит от условий эксплуатации преобразователя и приводит к погрешности измерений.

Анализ влияния термоЭДС

При разработке преобразователя СВЧ-мощности на основе радиоэлектрического эффекта возникает задача выделения ЭДС Холла из суммарного сигнала радиоЭДС (1). Контактную термоЭДС V_{TC} легко устранить путем выноса контактов из зоны действия СВЧ-волны. Соответствующая топология преобразователя СВЧ-мощности показана на рис. 2.

Методы снижения влияния термоЭДС на выходной сигнал измерителя мощности основываются на том, что ЭДС Холла и термоЭДС имеют различную природу и существенно отличаются друг от друга по своим физическим свойствам. Основные отличия заключаются в следующем:

1) ЭДС Холла обусловлена наличием электромагнитного поля в полупроводнике. Время установления имеет порядок 10^{-13} с. Термоэдс связана с весьма инерционными процессами выделения и распространения тепла в полупроводнико-

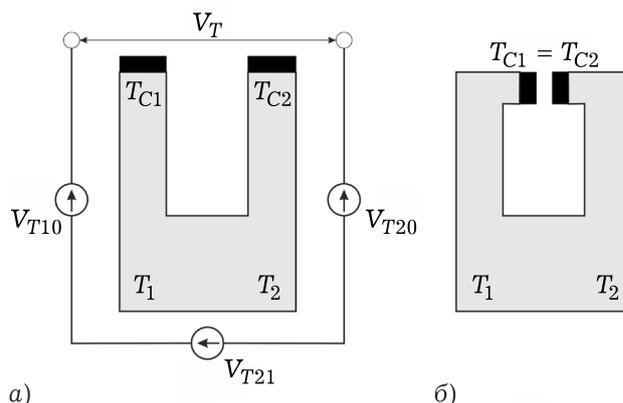


Рис. 3. Снижение термоЭДС в датчиках Холла: а) распределение температур и термоЭДС в датчике Холла с удлиненными выводами; б) топология датчика Холла, снижающая термоЭДС

вой пластине. Время установления и исчезновения термоЭДС лежит в пределах от единиц мс до нескольких десятков секунд.

2) Величина ЭДС Холла зависит от фазового соотношения между током, текущем через полупроводник и магнитным полем волны. ТермоЭДС такой зависимости не имеет.

3) ЭДС Холла зависит от векторного произведения электрического и магнитного полей, тогда как термоЭДС, возникающая из-за градиента температуры, обусловленного электрическим полем в линии передачи, зависит только от электрического поля волны, и не зависит от магнитного поля.

Рассмотрим распределение температур в датчике Холла с удлиненными выводами (рис. 3, а). Здесь V_{T10} - термоЭДС между контактом с температурой T_{C1} и левой гранью преобразователя; V_{T20} - между контактом с температурой T_{C2} и правой гранью; V_{T21} - между противоположными гранями преобразователя. Общая термоэдс в данном случае выражается формулой:

$$V_T = V_{T10} + V_{T21} + V_{T20}. \quad (5)$$

Выражая соответствующие термоэдс по формуле (3) и, учитывая их направления, получаем:

$$V_T = \alpha_T(T_1 - T_{C1}) + \alpha_T(T_2 - T_1) - \alpha_T(T_2 - T_{C2}) = \alpha_T(T_{C2} - T_{C1}). \quad (6)$$

Из (6) видно, что, уменьшая разность температур (т. е. обеспечивая хороший тепловой контакт) между контактами преобразователя, можно практически устранить термоэдс.

Для реализации рассмотренного принципа можно максимально приблизить друг к другу контактные площадки как показано на рис. 3, б. Практически одинаковые температуры контактных областей можно получить, если использо-

вать в качестве преобразователя полупроводниковый слой, получаемый на подложке с высокой теплопроводностью [5].

Экспериментальное исследование образцов

Авторами были разработаны и исследованы образцы преобразователей Холла на основе пленок карбида кремния, выращенных на кремниевых подложках методом газофазной эпитаксии, а также на основе пленок, полученных магнетронным распылением карбида кремния на кремниевых и ситалловых подложках. Образцы имели топологию датчиков Холла с удлиненными выводами (см. рис. 2).

Для исследования коэффициента преобразования полученных образцов была использована измерительная головка, схематично показанная на рис. 4.

Измерительная головка представляет собой отрезок стандартного волновода с узкой прорезью, сделанной в середине широкой стенки. Датчик Холла помещается в волновод через прорезь, так, что контакты находятся за пределами волновода. Измерительная головка с датчиком Холла включается в СВЧ-тракт между генератором и нагрузкой. Датчик Холла регистрирует проходящую СВЧ-мощность.

Принципиальная схема установки для исследования характеристик полученных образцов показана на рис. 5. Установка содержит генератор СВЧ (1), аттенуатор (2), измерительную линию (3), стандартный измеритель СВЧ-мощности (4), исследуемую измерительную головку с преобразователем Холла (5), согласованную нагрузку (6).

Вольт-ваттная характеристика образцов датчиков Холла в диапазоне от 0 до 10 Вт непрерывной проходящей СВЧ-мощности при длинах волн 30 и 8 мм приведена на рис. 6 (кривая 1). Для сравнения на этом же рисунке показана вольт-ваттная характеристика кремниевых датчиков Холла (кривая 2). С ростом уровня СВЧ-мощности чувствительность кремниевых датчиков снижается в следствие их разогрева.

Коэффициент стоячей волны измерительной головки с установленным датчиком Холла не превышал значения 1,2 во всем диапазоне мощностей как на частоте 10 ГГц, так и на частоте 40 ГГц.

Величина термоЭДС в исследованных образцах составляла не более 10 % от величины ЭДС

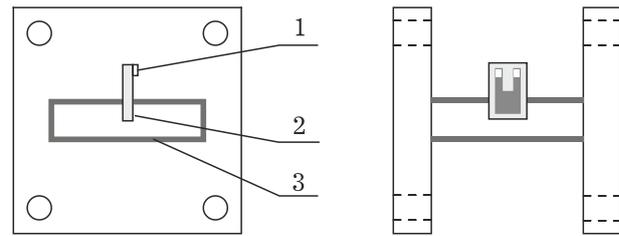


Рис. 4. Измеритель СВЧ-мощности с датчиком Холла: 1 — Контакты; 2 — датчик Холла; 3 — волновод

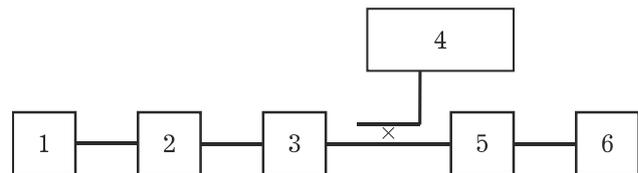


Рис. 5. Принципиальная схема установки для исследования измерителей проходящей СВЧ-мощности

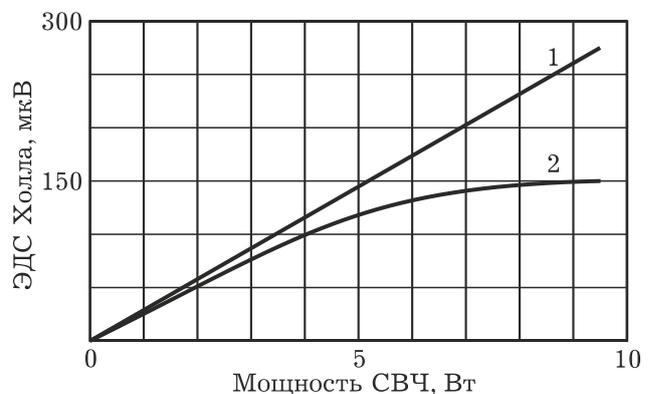


Рис. 6. Вольт-ваттная характеристика датчиков СВЧ-мощности на основе эффекта Холла: 1 — материал датчика SiC; 2 — материал датчика кремний

Холла. Этот результат приемлем для многих практических применений.

Сопротивление, определенное из ВАХ для всех образцов было примерно равно 500 Ом.

В данной работе использовался генератор СВЧ с максимальной выходной пиковой мощностью 3 кВт. Длительность импульсов генератора может изменяться от 1,0 до 8,0 мкс с дискретностью 0,1 мкс. Частота повторения импульсов изменяется от 10 до 100 Гц.

Полученные результаты

В данной работе были исследованы образцы преобразователей радиоэдс на основе гетероструктур 3C-SiC/Si. Была получена зависимость амплитуды радиоэдс от уровня пиковой СВЧ-мощности в диапазоне от 0 до 3000 Вт. Зависимость представлена на рис. 7.

Измерения проводились на частоте 10 ГГц при длительности импульсов 2 мкс и частоте повторения 50 Гц, т.е. скважность импульсов равня-

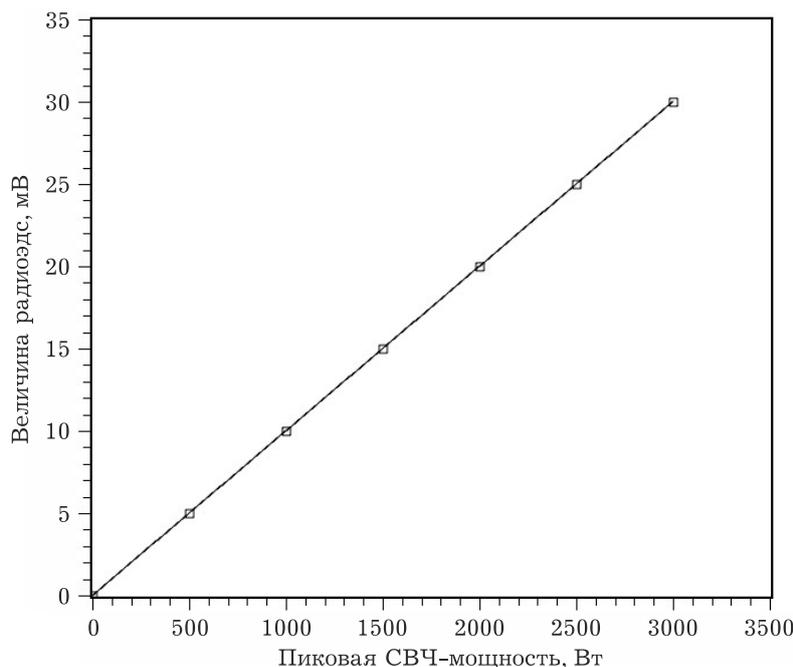


Рис. 7. Зависимость радиоЭДС от уровня пиковой СВЧ-мощности

лась 10000. Коэффициент преобразования исследованных образцов по пиковой мощности

$$k = \frac{U}{P} = 10 \pm 1 \text{ мкВ / Вт.} \quad (7)$$

Средняя СВЧ-мощность равна 0,3 Вт. При такой малой средней мощности эффект неоднородного разогрева образца будет практически отсутствовать, то есть измеряемый сигнал содержит только ЭДС Холла.

Для этих же образцов величина радиоэдс была равна 120 мкВ при уровне 10 Вт непрерывной СВЧ-мощности, что соответствует коэффициенту преобразования 12 мкВ/Вт. Различие коэффициентов преобразования для импульсной и непрерывной мощности обусловлено тем, что величина термоэдс имеет тот же порядок что и ЭДС Холла.

Величина термоэдс была определена также методом стоячей волны [4] при 10 Вт непрерывной мощности. В этом случае максимальное значение термоэдс было равно 30 мкВ, т. е. коэффициент преобразования термоЭДС равен 3 мкВ/Вт.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что термоэлектрическая составляющая радиоэлектрического эффекта пренебрежимо мала по сравнению с ЭДС Холла при больших скважностях импульсов.

В этом случае радиоэлектрический эффект может быть использован как для измерения импульсной СВЧ-мощности, так и для определения электрофизических параметров полупроводниковых материалов на сверхвысоких частотах.

Использование радиоэлектрического эффекта открывает возможность создания малогабаритных быстродействующих приборов для измерения уровня проходящей СВЧ-мощности. Диапазон рабочих частот таких датчиков достигает сотен гигагерц. Влияние сопутствующих эффектов может быть снижено или полностью устранено за счет оптимального выбора конструкции чувствительного элемента. А в случае измерения импульсной мощности.

Таким образом, рассмотренные преобразователи СВЧ-мощности могут найти применение в устройствах СВЧ и автоматических измерительных системах, устанавливаемых на объектах военной и космической техники.

Список литературы

1. Измерение мощности на СВЧ / М.И. Билько [и др.]. М.: Сов. радио, 1976. С. 168.
2. Barlow H.E.M., Kataoka S. A Hall effect and its application to power measurement at 10Gc/s // Proc. IEEE. 1958. Vol. 105B. P. 53-60.
3. Гуляев Ю.В. О возникновении постоянной ЭДС при распространении электромагнитной волны в проводящей среде // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13. № 4. С. 688-694.
4. Комов А.Н., Трещев В.М., Яровой Г.П. Гальваномагнитные СВЧ-преобразователи. М.: Радио и связь, 2000. С. 264.
5. Курганская Л.В., Щербак А.В. Влияние термоЭДС на работу гальваномагнитных преобразователей СВЧ-мощности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 6. С. 26-29.

Fast microwave power converter based on the radioelectrical effect

A.V. Shcherbak, L.V. Kurganskaya, D.U. Golubeva

The problem of practical application of Hall effect at microwave frequencies to measure of continuous and pulsed microwave power passing in a rectangular waveguide was considered. The analysis of contribution of Hall effect, thermopower and contact thermopower to summary output voltage of converter was carried out. Methods of reducing volume and the contact thermopower have been suggest. Samples of semiconductor microwave power converters based on Hall effect have been designed and constructed. The influence of microwave power level on the conversion factor has been studied. It was found that the conversion coefficient not altered in dependence of the microwave power from 0 to 10 W of continuous signal and from 0 to 3000 W of pulsed signal with duty cycle lower 0.08 %.

Keywords: microwave Hall effect, microwave power converter, microwave power measurement.

Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Антипов О.И., Неганов В.А., Потапов А.А.

Детерминированный хаос и фракталы
в дискретно-нелинейных системах

РАДИОТЕХНИКА

В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.