

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ОБРАЗА АТОМА КРЕМНИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Л.М. Макаров¹, С.В. Протасеня^{1*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: saitvodabur@yandex.ru

Информация о статье

УДК 519.61

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Макаров Л.М., Протасеня С.В. Моделирование фрактального образа атома кремния в микроэлектронике // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 91–98.

Аннотация: Рассмотрены вопросы синтеза фрактальной модели, учитывающие особенности технологии создания полупроводниковых структур на основе стабильных изотопов кремния. Установлен общий принцип априорного создания полупроводниковых материалов, способных реализовать высокий показатель теплопроводности для изделий микроэлектроники, эксплуатируемой на высоких частотах. Представлены составляющие общей концепции синтеза новых образцов изделий микроэлектроники, демонстрирующие перспективы компьютерного моделирования фрактальных образов атомарных конструкций полупроводников.

Ключевые слова: моделирование, микроэлектроника, фрактальный образ, изотоп, полупроводники.

Многие технические и технологические решения в современном мире создаются на основе большого информационного материала. Информационные ресурсы сети Интернет постоянно пополняются новыми публикациями, размышлениями и суждениями. Социум средствами телекоммуникаций воспроизвел огромный научный пласт знаний и практических результатов натурных исследований, которые являются основой для конструирования новых понятий, направленных на решение актуальных проблем.

Развитие микроэлектроники традиционно связано с элементной базой, обеспечивающей создание сложных вычислительных устройств. Целенаправленная модернизация элементной базы сегодня формируется на основе квантовой теории, вскрывающей «тонкие эффекты полупроводника». Утонченность новых понятий часто создается посредством модели, реализуемой компьютером и средствами визуализации результатов, например, фрактальными моделями [4]. Введение этих понятий подчеркивает тот факт, что современная микроэлектроника является большим научно-производственным кластером, обеспечивающим прогрессивное развитие социума. В историческом отношении развитие микроэлектроники характеризуется серией научных разработок. Научные концепции микроэлектроники основываются на большом количестве исследовательских работ в

области кристаллографии, атомарной физики и химии. Первые опытные проекты по созданию полупроводниковых структур относят к середине двадцатого столетия. Относительно несложные физические модели полупроводниковых элементов, исполненные в лабораторных условиях, инициировали создание первых промышленных образцов полупроводниковых изделий. В дальнейшем, с развитием промышленного выпуска средств вычислительной техники, потребность в полупроводниковых изделиях резко возросла. Типичную группу полупроводников составляют атомы германия, кремния, селена, теллура, мышьяка.

Наряду с промышленным ростом выпуска полупроводников повышались требования к техническим параметрам изделий. На первых этапах эти требования рассматривались на уровне геометрических размеров, критических параметров работы в разных условиях эксплуатации технических изделий.

Совершенствование технологии производства микроэлектронных компонентов для вычислительных систем создало общую концепцию производства интегральных схем. Этот этап развития микроэлектроники стимулировал развитие новой концепции технологического развития производства, где большое внимание уделяется метрологии и средствам технологического контроля. Этим аспектам производственного процесса уделяется

большое внимание. Совершенствование технических показателей полупроводниковых изделий в большей степени зависит от качества и состава природного материала полупроводников. Совершенствуя научные основы физики полупроводников, становится возможным создание сложных монокристаллов.

Большие интегральные схемы явились логической надстройкой в технологии по производству средств микроэлектроники. Современные концепции развития отрасли микроэлектроники свидетельствуют о постоянном росте научного и технологического потенциала, ориентированного на создание ультрабольших интегральных схем. Кристаллическая структура таких микроэлектронных средств, например, микропроцессора, создается на основе примерно $3 \cdot 10^9$ экземпляров транзисторов, обладающих длиной затвора около 8 нм.

Для микроэлектроники, как промышленного кластера, большое значение придается научным (физическим) исследованиям, а также разработке и освоению новых технологий создания прогрессивных изделий. Прогресс в отрасли наблюдается на фоне непрерывного повышения уровня сложности производства и технологии мониторинга качества готовых изделий. Так, например, на начальном этапе становления отрасли, производство схем динамической памяти емкостью всего 64 Кбит на сетке в 3,0 мкм проводилось по технологии в 100 операций и семью литографическими процедурами. Эта же технология вначале двадцать первого столетия, реализует производство микросхем с 1 Гбит памяти 440 операциями на сетке в 0,13 мкм и посредством 21 литографической процедуры. Совершенствование микроэлектронных изделий проводится по широкому перечню полупроводников, но основное внимание уделяется атомам кремния и германия.

Выделяя физические аспекты в исследовании свойств полупроводников, устанавливается почти очевидный факт, что электрические свойства неметалла сильно зависят от примесей. Именно обширные физические исследования устанавливают аномальные свойства типичных полупроводников: германия и кремния. В промышленности эту особенность используют, модулируя нужный тип полупроводника. При нормальной температуре кремний хрупок, но при нагревании выше 800 °C возможна пластическая деформация. Для германия устанавливается наличие специфических свойств, которые позволяют создавать уникальные приборы, например, видеорегистраторы.

Существует несколько технологических схем получения кристаллического кремния методом электрического расплава. В качестве исходного материала используется кварцит, иногда кварц. Кварцит представляет типичную горную породу зернистого строения. Кварц представляет хорошо

различимую структуру оксида кремния, основу которой составляет шестигранная призма.

Природные формы кремнезема представлены минералом кварцем или породами почти полностью им сложенными – кварцитом. Инородные минералы, содержащиеся в кварците, золе восстановителя и электродах, являются источником поступления в кремний железа, алюминия, кальция и других элементов. Относительно несложная технология добычи кварцита порождает проблемы получения образцов кремния с малой долей примесей. Типичная характеристика кремневого сырья представляется составом: SiO₂ (98 %); Fe₂O₃ (0,25 %); Al₂O₃ (0,6 %); CaO (0,25 %). Конечный продукт – кристаллический кремний характеризуется составом: Si (99,2–97,84 %); Fe (0,39–0,8 %); Al (0,25–0,45 %); другие примеси (0,32–0,54 %).

Независимо от типа и происхождения кристаллического кремния, полученные квадратные, псевдоквадратные призмы и цилиндры из кремния разрезаются на пластины, на которых методами планарной технологии создаются электронные приборы.

Технологический процесс создания кремниевых ИС представлен двумя направлениями. Первое направление имеет аббревиатуру FEOL (*от англ.* «front end of line» или «front end processing») и характеризует процесс создания активных приборов – транзисторов. Второе направление – BEOL (*от англ.* «back end of line» или «back end processing») – характеризует группу процессов по созданию межэлементных связей внутри микроструктуры электронного изделия. Эти направления имеют общую концепцию развития. В относительно недавнем прошлом основным тезисом концепции являлось уменьшение размеров полупроводниковых приборов, что позволяло повысить рабочую частоту. Разработка таких проектов тесно связана с технологическими особенностями получения кристаллического кремния. Стремление понизить размеры полупроводниковых приборов реализовывалось средствами новейших методов и технических средств контроля технологического процесса. Развитие технических систем мониторинга всего технологического процесса – от производства кремневого сырья до полупроводникового прибора инициировало работы по моделированию полупроводниковых структур.

Создание моделей полупроводниковых структур широко распространено. Для этого направления характерно рассмотрение некоторого списка вопросов, раскрывающих как природные (физические (химические) свойства исходного материала), так и исключительно виртуальные понятия. Так, например, технологические требования создания «тонкой области» затвора транзистора, продиктованные практическими соображениями о малых размерах полупроводникового прибора, сформированы

ровали устойчивый образ двумерного и плоского слоя. В физическом отношении такие слои создаются на основе связанных атомов. По серии исследований установлено, что толщина двумерного материала много меньше типичных образцов, обладающих «линейной – плоской структурой». Двумерный материал полупроводника создается как монослой гофрированного типа. В такой структуре условно можно выделить «среднюю плоскость», относительно которой создается монослой с чередующимися по высоте расположения атомами. Основное преимущество «двумерных материалов» в том, что созданный на их основе полупроводниковый прибор обладает значительно меньшими размерами. Такой результат достигается посредством предварительного расчета, моделирования новой кристаллической структуры и, что самое важное, на основе определенного химического состава исходного материала – пластин кремния.

Пластины кремния, как основа производства полупроводниковых приборов, должны соответствовать определенным требованиям по чистоте. В реальных условиях производственной линии сверхбольшой интегральной схемы на пластины воздействует множество факторов. Технологически чистой считается поверхность, концентрация примесей на которой не препятствует воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров интегральной микросхемы.

Загрязнения можно рассматривать как примеси, находящиеся на поверхности пластин. Условно такие примеси подразделяются на несколько групп. Твердые поверхностные примеси отличаются по физическим и химическим свойствам от пластин кварца. Примеси могут неравномерно располагаться по поверхности пластин, образуя своеобразный рисунок, наблюдаемый посредством электронного микроскопа. Происхождение этих примесей разнообразно и не всегда удается учесть.

Аморфные примеси, как правило, представлены пленками с толщиной слоя 1–2 нм. К этой группе следует отнести пленки собственных оксидов кремния. Типичное представление о качестве по чистоте кремниевого материала формирует представление о трех кластерах.

Первый кластер отождествляют с кремнием высокого качества (99,999 %), пригодным для создания электронных изделий и высоким показателем времени жизни основных носителей заряда.

Наличие в полупроводнике, при определенных условиях, основных и неосновных носителей заряда, характеризует неравновесное состояние. Поскольку такое состояние не характерно для полупроводника, неравновесное состояние сменяется равновесным состоянием, как только исчезает управляющее внешнее воздействие. Длительность

перехода к равновесному состоянию определяется временем жизни неосновных носителей заряда. Поскольку концентрация основных носителей заряда при управляющем воздействии меняется незначительно, принято рассматривать время жизни неосновных носителей заряда. Так, например, для дырочной конструкции полупроводника после прекращения управляющей инжекции электронов изменение неравновесной концентрации электронов объясняется наличием разности скоростей рекомбинации и генерации. Скорость смены управления состоянием полупроводника характеризуется рабочей частотой. Понятие о рабочей частоте можно воспроизвести в терминах квантовой теории, где требуется учитывать массу полупроводника, образованную разными пропорциями позитронов и нейтронов.

Второй кластер характеризует полупроводниковый кремний (99,999 %) так называемого солнечного вещества, широко используемого в фотоэлектрических преобразовательных приборах.

Третий кластер представлен так называемым техническим кремнием (98 %), широко используемым в производстве поликристаллического кремния.

Многие свойства полупроводников объясняются особенностями атомарной конструкции, созданной на аксиомах квантовой теории. В основе атомарной концепции находится постулат, согласно которому в Природе существуют только уникальные атомарные конструкции. Изменение физических свойств атомов возможно при условии модификации массы атома. Следуя этим представлениям, подчеркнем важность понятия связи заряда атома с порядковым номером в таблице химических элементов Д.И. Менделеева. Наличие протонов и нейтронов, реализующих сложный процесс взаимного превращения и определяющих массу атома, способствует расширению понятия о строении атома, о модификации массы, об изотопе химического элемента.

Изменение изотопного состава образца вещества модифицирует физические свойства объекта [5]. В целом, для большинства атомов химических элементов изменение изотопного состава мало влияет на химические свойства, лишь отчасти модифицируя физические параметры. Однако, для типичных полупроводниковых объектов – атомов кремния и германия, эти представления можно признать неполными. Переход к нанотехнологиям, затрагивающим физические эффекты на малых атомарных расстояниях, сформировал представление о важности учета изотопного состава образцов полупроводникового материала.

Чистые полупроводники являются объектом, главным образом, теоретического интереса. Основные исследования полупроводников связаны с созданием сложных атомарных конструкций,

обеспечивающих, как минимум, высокое быстродействие. Создание сложных атомарных конструкций базируется на теоретических расчетах и натуральных исследованиях лабораторных образцов. Надо признать, что на практике это большие затраты. Польза этих исследований часто невелика, поскольку трудно изначально разработать генеральный план создания полупроводника с заданными свойствами. Хорошо известно, что чистые полупроводниковые материалы, такие как германий и кремний, содержат при комнатной температуре небольшое количество электронно-дырочных пар и поэтому способны поддерживать небольшие токовые нагрузки. Для увеличения проводимости чистых материалов используется процесс легирования.

Другое направление современных исследований физики полупроводников базируется на квантовой теории, рассматривающей атомарную конструкцию. Известно, что масса атома формируется позитрон-нейтронной парой. Изменение количества нейтронов в структуре атома позиционируется новой атомарной конструкцией – изотопом. Для любого химического элемента известного в настоящее время обнаружен уникальный набор изотопов. Кремний и германий, как полупроводниковые материалы, не исключение. Современная практика создания технологического сырья для полупроводниковых изделий дополняется новыми физическими понятиями. В частности, существенного влияния изотопного состава полупроводника на технические показатели изделий микроэлектроники.

В настоящее время известно, что серия методов исследования – ядерный магнитный резонанс, построение сечений рассеивания нейтронов и спектра ядерных состояний убедительно свидетельствует об отсутствии явных признаков изменения физических и химических свойств атомарных конструкций большинства атомов. Однако, для некоторых полупроводниковых атомарных конструкций эти представления не соответствуют действительности. В атомарных конструкциях полупроводников, где учитывается изотопный состав материала, проявляются важные физические эффекты. В самом общем понимании физики наблюдаемого явления превалирует мнение о наличии «скрытых» атомарных процессов.

Такие изотопические процессы наиболее отчетливо проявляются в типичных полупроводниковых структурах германия и кремния. Интерес к детальному изучению физики изотопических процессов обосновывается необходимостью создания надежных образцов микроэлектроники.

В качестве базового тезиса, поясняющего существо наблюдаемого изотопического явления, рассматривается отчетливо наблюдаемый в эксперименте феномен: увеличение теплопроводности

полупроводниковой структуры, созданной на основе определенного изотопа. Высокая степень теплопроводности полупроводникового материала позволяет создавать изделия микроэлектроники, способные работать на высокой тактовой частоте, и, следовательно, обладать способностью реализовывать большее количество вычислительных процедур.

В исследовании изотопических явлений традиционно оперируют базовыми понятиями физики. Так, при описании динамики смены состояний полупроводниковой кристаллической структуры используют терминологию акустики. Это оказывается полезным при формировании кинетической модели распределения фононов, сопоставляемых с дискретным тепловым потоком. Впервые проблема зависимости фононной теплопроводности от средней массы атома, с учетом изотопного состава, рассматривалась в середине двадцатого столетия в работах А.Ф. Иоффе [5]. Наблюдаемый феномен происходит благодаря уникальному строению кристалла атома полупроводника и определенной массовой доли нейтронов. Сочетание массовой доли реального атома и нейтронной добавки порождает эффект фононного резонанса, способствующего увеличению теплопроводности. Изотопический эффект отчетливо проявляется у атомов кристаллов германия и кремния. Это оказывается полезным при создании аппаратных полупроводниковых изделий микроэлектроники, работающих на высоких частотах.

Рассмотрим типичный набор полупроводниковых структур, основу которых составляют изотопы. Часть из них является природными, а другая часть получена искусственно. Время жизни изотопов оценивается периодом полураспада. Согласно квантовой теории некоторые изотопы имеют очень большой период полураспада. Это так называемые стабильные изотопы [5]. Другие изотопы обнаруживают изменения массы атома за определенное время.

Типичный перечень изотопов кремния представлен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Набор изотопов кремния

Символ	Количество протонов (p)	Количество нейтронов (n)	Масса изотопа (а.е.м.)	Период полураспада
²⁸ Si	14	14	27,976	стабилен
²⁹ Si	14	15	28,976	стабилен
³⁰ Si	14	16	29,973	стабилен
³¹ Si	14	17	30,975	157,3 мин
³² Si	14	18	31,974	170,0 лет
³³ Si	14	19	32,978	6,18 с
³⁴ Si	14	20	33,978	2,77 с
³⁵ Si	14	21	34,982	780 мс

На практике широко используются полупроводниковые материалы на основе кремния, созданные с участием изотопа ^{28}Si . Именно такая структура кристалла кремния, с контролируемым энергетическим спектром, позволяет создавать современные микроэлектронные изделия.

Альтернативой атому кремния, для микроэлектроники, является атом германия, который часто рассматривается в качестве дублера (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Набор изотопов атома германия

Символ	Количество протонов (p)	Количество нейтронов (n)	Масса изотопа (а.е.м.)	Период полураспада
^{69}Ge	32	37	68,927	39,05 ч
^{70}Ge	32	38	69,924	стабилен
^{71}Ge	32	39	70,9249	11,41 суток
^{72}Ge	32	40	71,92207	стабилен
^{73}Ge	32	41	72,92345	стабилен
^{74}Ge	32	42	73,92117	стабилен
^{75}Ge	32	43	74,9228	82,78 мин
^{76}Ge	32	44	75,9214	$1,58 \cdot 10^{21}$ лет

Наличие современных информационных технологий, позволяющих создавать компьютерные модели на основе разных семантических ресурсов, понятий и определений позволяет средствами математики проводить построение математической модели [4]. Математическая модель рабочей полупроводниковой структуры, воспроизводимая с учетом постулатов квантовой теории и зонной теории проводимости, создается на основе фрактала:

$$\begin{aligned} X(t) &= (R+r)\cos(t) - r\cos\left(\frac{R+r}{r}t\right) \\ Y(t) &= (R+r)\sin(t) - r\sin\left(\frac{R+r}{r}t\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Фрактал позиционирует диссипативную систему, отождествляемой с образом полупроводниковой структуры, с учетом установленных параметров развертки событий.

Дробный показатель, как первичный признак фрактального образа, конструируемого, например, в декартовой системе, позволяет использовать типичные компьютерные вычислительные среды. Выберем в качестве вычислительной среды EXCEL. Относительная простота написания макросов позволяет воспроизвести вариативные фрактальные образы.

Выбор функционала проведем на группе соотносимых объектов, например, окружностей. Типичным функционалом, реализующим сложную плоскую кривую, является уравнение эпициклоиды, где базовыми объектами являются две окружности с радиусами R и r . Эпициклоида позиционируется плоской кривой, образуемой фиксирован-

ной точкой окружности, катящейся по внешней стороне другой окружности без скольжения.

Создадим графический образ для изотопа ^{28}Si . Воспользуемся данными таблицы 1 и выражения (1). Предположим, что $R = p$ и $r = n$, тогда $R = p = 14$, $r = n = 12$, при $t = (0,2\pi)$ (рисунок 1).

Согласно сведениям натуральных исследований, такая структура атома кремния воспроизводит показатель теплопроводности на 24 % больше, чем при иных сочетаниях протонов и нейтронов в атомарной конструкции кремния [6].

Резюмируя многочисленные научные материалы по теме высокой теплопроводности полупроводниковой структуры, созданной на основе кремния ^{28}Si , примем фрактальный образ за основу. Для образа введем показатель:

$$\Omega = \frac{p}{n} = 1,0 \quad (2)$$

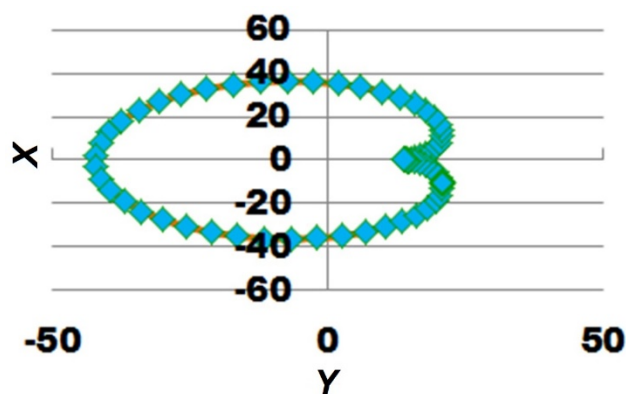


Рис. 1. Фрактальный образ атома кремния ^{28}Si , $\Omega = 1.0$

Формально такая атомарная конструкция отождествляется с естественной природной конструкцией атома кремния. В качестве суждения по этому тезису следует указать, что в прошлом, когда изотопному составу полупроводника не уделялось должного внимания, в производстве и технологии создания средств микроэлектроники это представлялось обычным совпадением оптимальных условий физической реализации материального объекта. Однако стремление улучшить проводимость полупроводника методом легирования способствовало актуализации натуральных исследований, а затем теоретического осмысления рабочих процессов полупроводниковой структуры в разных, в энергетическом смысле, атомарных конструкциях. Долгий и затратный механизм создания новых полупроводниковых структур на основе натуральных исследований дополнился теоретическими положениями [2, 3]. На практике решение этой проблемы можно рассматривать на основе квантовой теории атома, реализуемой средствами моделирования атомарных конструкций [1], в том числе и сложных атомарных конструкций, получаемых методом легирования. В этом смысле, высокая скорость получения результатов посредством компьютерного моделирования, позволяет сокра-

тить финансовые и временные затраты и, одновременно с этим, указать направление высоко перспективных разработок полупроводниковых структур [3]. Выделяя этот тезис, воспроизведем серию фрактальных образов на основе атома кремния.

По аналогии создадим графический образ для изотопа ^{29}Si . Полагая $p = 14$, $n = 15$ представим образ на рисунке 2.

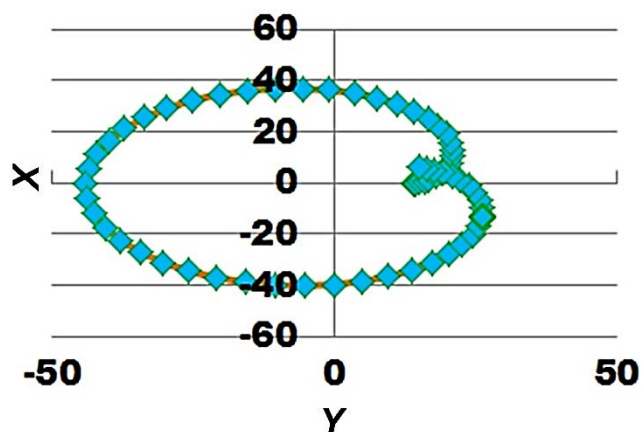


Рис. 2. Фрактальный образ атома кремния ^{29}Si , $\Omega = 0,93$

Исполнив необходимые расчеты, создадим образ ^{30}Si (рисунок 3).

Отмечаем, что изменение изотопного состава кремния ухудшает теплопроводность. Это следует из анализа серии графических образов атомов кремния. По мере добавления в композицию атомов новых изотопов происходит искажение базового образа (рисунок 1). Акцентируя внимание на модификации исходного образа, можем констатировать возможность получения количественных показателей фрактального набора. Представленная процедура создания структуры полупроводника, на основе нескольких изотопов кремния, демонстрирует утрату высокого показателя теплопроводности ($\Omega \rightarrow 0$). Это суждение реализуется на основе простых вычислений, реализуемых выражением (1).

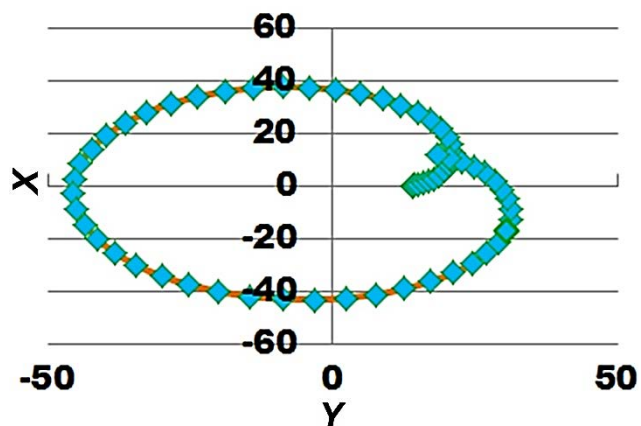


Рис. 3. Фрактальный образ атома кремния ^{30}Si , $\Omega = 0,88$

Рассмотрим типичную композицию атомов кремния ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si (рисунок 4), созданную по технологии легирования ($^{28}\text{Si} = 0,87$, $^{29}\text{Si} = 0,008$, $^{30}\text{Si} = 0,122$).

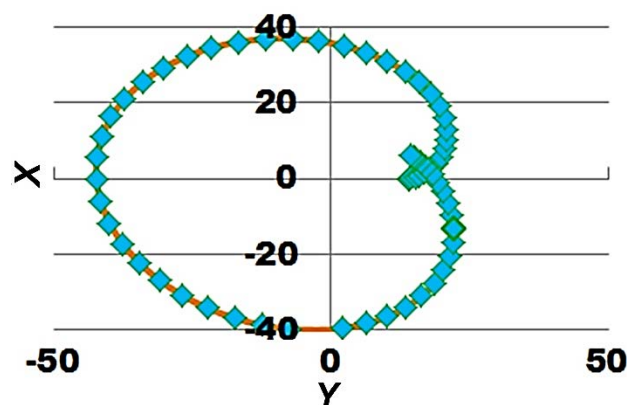


Рис. 4. Фрактальный образ атомов кремния ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si , $\Omega = 0,93$

Проведем аналогичные вычисления для структур полупроводников на основе германия. Природный атом германия характеризуется параметрами $p = 32$, $n = 32$. (^{64}Ge). Типичный стабильный природный образец изотопа атома (^{70}Ge) германия: $p = 32$, $n = 38$. Это атомарная конструкция создана на основе стабильного изотопа германия с наименьшим количеством нейтронов. Образ изотопа атома ^{70}Ge представлен на рисунке 5.

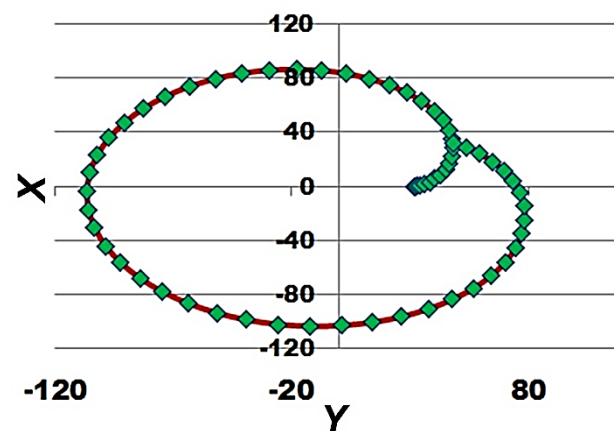


Рис. 5. Фрактальный образ атома германия ^{70}Ge , $\Omega = 0,8421$

Теплопроводность германия-70 (^{70}Ge) в несколько раз выше, чем у германия природного изотопного состава.

Фрактальный образ для изотопа ^{72}Ge представлен на рисунке 6, а для изотопа ^{73}Ge на рисунке 7. Композиционный образ полупроводника созданного на основе технологии легирования (^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge) представлен на рисунке 8.

Продолжим создание типичного набора фрактальных образов на основе изотопов германия и проведем сравнение с изотопным набором атомов кремния.

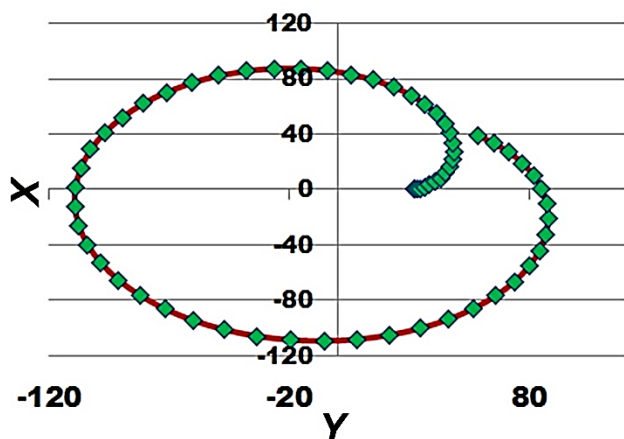


Рис. 6. Фрактальный образ атома германия ^{72}Ge , $\Omega = 0,8$

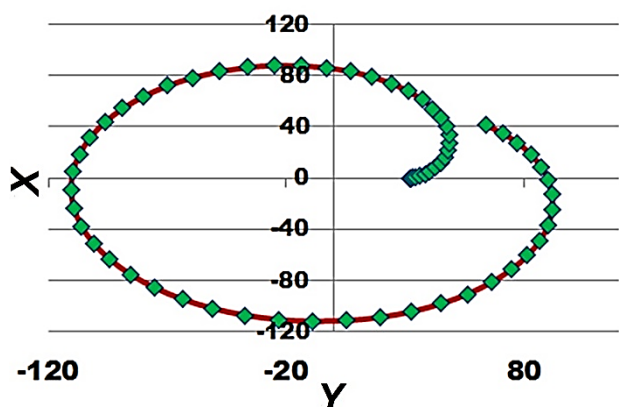


Рис. 7. Фрактальный образ атома германия ^{73}Ge , $\Omega = 0,7804$

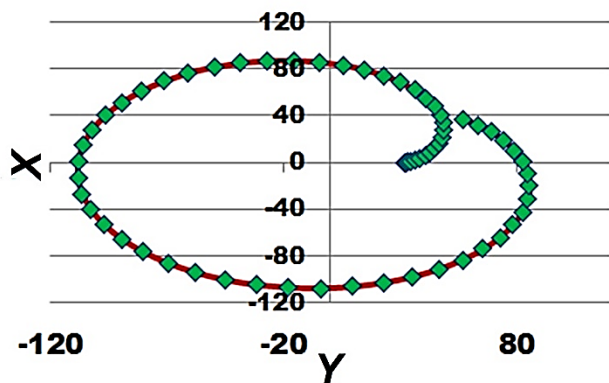


Рис. 8. Фрактальный образ атомов германия ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , $\Omega = 0,8067$

Представленные результаты в формате графических образов, созданных на основе функционала (1), свидетельствуют о подобии полупроводниковых структур германия и кремния. Наряду с этим использование базовой фрактальной модели позиционирования атомов полупроводниковых структур убедительно свидетельствует о возможности проведения широкого списка исследовательских задач. В качестве иллюстрации созданных представлений создадим таблицу сводных результатов (таблица 3).

ТАБЛИЦА 3. Сводные данные результатов расчета

№	Итерации анализа	Показатель теплопроводности Ω
Кремний		
1.	^{28}Si	1
2.	^{29}Si	0,931
3.	^{30}Si	0,881
4.	Si (28 + 29 + 30)	0,933
Германий		
1.	^{70}Ge	0,842
2.	^{72}Ge	0,8
3.	^{73}Ge	0,780
4.	Ge (70 + 72 + 73)	0,806

Представленные данные оформим графически – в виде треков для разных атомов изотопов.

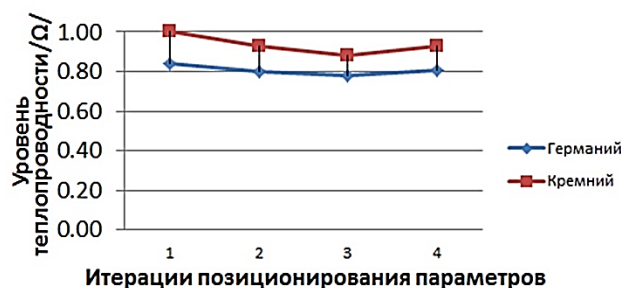


Рис. 9. Треки изменения теплопроводности для разных изотопов германия и кремния

Представленные результаты свидетельствуют о важности рассмотрения вопросов теплопроводности полупроводников с учетом изотопного состава материала. Данное суждение основывается на существовании многочисленных результатов натуральных исследований, исполненных в рамках представлений о диссипативной системе атомарной конструкции полупроводника.

Заключение

Стремление создать совершенную элементную основу в микроэлектронике по современным представлениям достижимо, но требует проведения натуральных исследований, которые всегда сопряжены с большими затратами. Принимая этот тезис за основу, и понимая важность натуральных исследований, актуализируется задача предсказания свойств полупроводникового материала на основе имеющихся физических данных. Априорные сведения о полупроводниковой структуре можно получить посредством моделирования, например, на основе фрактальной модели. Предложенный формальный процесс построения модели и реализм получаемых априорных результатов о свойствах полупроводниковой структуры, на серии подобных исследований полупроводников убедительно демонстрирует общий тезис об адекватности модели.

Предложенная модель построения фрактального образа полупроводника хорошо согласуется с имеющимися физическими понятиями об изменениях свойств полупроводников при легировании. Развивая эти представления, можно создать достаточно сложные аддитивные композиции полупроводниковых структур, естественно, обладаю-

щих нелинейными показателями, в частности, показателем теплопроводности. Наличие такой модели, как инструмента познания и конструирования полупроводниковых структур, способствует развитию технологий производства сложных изделий микроэлектроники.

Список используемых источников

1. Макаров Л.М. Алгоритм позиционирования атомов химических элементов // EUROPEAN RESEARCH: INNOVATION IN SCIENCE, EDUCATION AND TECHNOLOGY. Collection of scientific articles XXXIX International scientific and practical conference. 2018. С. 9–16.
2. Макаров Л.М. Априорные знания об атомах химических элементов // Проблемы современной науки и образования. 2018. № 5 (125). С. 6–15.
3. Макаров Л.М., Поздняков А.В. Формализм позиционирования стабильных изотопов // Проблемы современной науки и образования. 2018. № 6 (126). С. 119–124.
4. Макаров Л.М., Протасеня С.В. Оценка трафика телекоммуникационной сети в условиях высокой неопределенности обнаружения семантических признаков // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 70–78.
5. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 528 с.
6. Гусев А.В., Гавва В.А., Козырев Е.А. Выращивание монокристаллов стабильных изотопов кремния // Перспективные материалы. 2010. № 8. С. 366–369.

* * *

THE FRACTAL SIMULATION IMAGE OF ATOM OF SILICON IN MICROELECTRONICS

L. Makarov¹, S. Protasenya¹

¹The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Makarov L., Protasenya S. The Fractal Simulation Image of Atom of Silicon in Microelectronics // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 2. PP. 91–98.

Abstract: *The questions of synthesis of fractal model considering features of technology of creation of semiconductor structures on the basis of stable isotopes of silicon are considered. The general principle of aprioristic creation of the semiconductor materials capable to realize a high rate of heat conductivity for products of the microelectronics operated at high frequencies is established. The components of the general concept of synthesis of new samples of products of microelectronics showing the prospects of computer modeling of fractal images of atomic designs of semiconductors are presented.*

Keywords: *simulation, microelectronics, fractal image, isotope, semiconductors*