

микроэлектронного и радиоэлектронного оборудования. На сегодняшний день гексаферриты М-типа (многокомпонентные магнитные оксиды) – наиболее перспективные для практических применений. Диапазон резонансного поглощения данных материалов лежит в области 50 ГГц и существует возможность контролируемого управления поглощающими свойствами в широком диапазоне частот путем незначительного изменения химического состава. Осуществлять частотно-селективное управление поглощающими характеристиками в гексаферритах можно путем смещения частоты естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) за счет изменения величины магнитокристаллической анизотропии (путем диамагнитного замещения ионов железа или внешним магнитным полем). Проведены измерения коэффициентов прохождения (ослабления ЭМИ) в диапазоне частот 25,8–78,3 ГГц и во внешних магнитных полях до 8 кЭ для керамических образцов твердых растворов Al-замещенных гексаферритов бария М-типа  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  ( $x = 0,1-1,2$ ). Показано, что замещение ионами алюминия увеличивает магнитокристаллическую анизотропию в гексаферритах М-типа и индуцирует смещение пика ЕФМР в область более высоких частот (от 51 ГГц для  $x = 0,1$  до 61 ГГц для  $x = 1,2$ ). Отмечено, что с ростом концентрации ионов алюминия амплитуда пика ЕФМР уменьшается с –30 дБ ( $x = 0,1$ ) до –20,5 дБ ( $x = 1,2$ ), обеспечивая уменьшение энергии прошедшего ЭМИ на 2–3 порядка в целом. Причиной снижения амплитуды может являться снижение магнитных потерь из-за фрустрации магнитной структуры гексаферрита. Установлено, что наложение внешнего магнитного поля (8 кЭ) позволяет контролируемо сдвигать пик резонансного поглощения в более высокочастотную область (вплоть до 78 ГГц). Это дает возможность управлять микроволновыми характеристиками допированных ионами алюминия гексаферритов бария в аномально широком частотном диапазоне (от 51 ГГц до 78 ГГц), что открывает перспективу для практических применений в СВЧ-технике и обеспечении ЭМС.

## **АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ШИФРОВАНИЯ DES НА БАЗЕ FPGA**

Н.С. Уваров, Д.И. Шуманский

В современном мире не обойтись без сохранения данных, алгоритмы шифрования присутствуют везде. В данной работе была поставлена задача реализации DES шифрования на базе FPGA с использованием конвейера. DES (Data Encryption Standard) – симметричный алгоритм шифрования, разработанный фирмой IBM и утвержденный правительством США в 1977 году как официальный стандарт. DES имеет блоки по 64 бита и 16 цикловую структуру сети Фейстеля, для шифрования использует ключ с длиной 56 бит. Алгоритм используют комбинацию нелинейных (S-блоки) и линейных (перестановки E, IP, IP-1) преобразований. Для Des рекомендовано несколько режимов. DES был национальным стандартом США в 1977- 1980 гг. но в настоящее время DES используется (с длины 56 бит) только для устаревших систем, чаще всего используют его более криптоустойчивый вид (3DES, DESX). 3DES является простой эффективной заменой DES, и сейчас он рассмотрен как стандарт. Алгоритм DES широко применяется для защиты финансовой информации. В работе был реализован алгоритм шифрования DES с конвейерной обработкой на базе FPGA. В ходе работы были получены следующие результаты: рабочая частота, аппаратные затраты и потребляемая мощность.

### **Литература**

1. Панасенко, С.П. Алгоритмы шифрования. Специальный справочник / С.П. Панасенко. – СПб.: БВХ-Петербург, 2009.
2. Бибило, П.Н. Основы языка VHDL / П.Н. Бибило. – М.: Издательство ЛКИ, 2007.

## **ТОНКИЕ ПЛЕНКИ КЕСТЕРИТА НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Е.А. Уткина, А.И. Воробьева, Е.А. Чекмарев

Создание автономных систем электроснабжения средств защиты информации является актуальным направлением современной электроники. Разработка недорогих и экологически безопасных фотоэлектрических элементов и батарей на их основе является одним из таких

направлений. Четверные полупроводники на основе сульфидов меди, цинка, олова–кестерита  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) интенсивно исследуются в последнее время для использования в качестве слоя-поглотителя тонкопленочных фотовольтаических элементов благодаря оптимальному значению ширины запрещенной зоны (1,5 эВ) и высокому коэффициенту оптического поглощения ( $10^4 \text{ см}^{-1}$ ). Все составные элементы (и исходные реактивы) нетоксичны и достаточно широко распространены в природе, что позволяет сократить стоимость при высокой эффективности фотопреобразования (достигнутая эффективность фотоэлементов превысила 12 % в 2014 г.).

Для формирования пленок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  использовали метод SILAR, как наиболее простой и экономичный способ формирования многокомпонентных полупроводниковых соединений. Растворы осаждения имели следующий состав: катион-содержащего прекурсора 0.1 М  $\text{CuSO}_4$ , 0.05 М  $\text{ZnSO}_4$ , 0.05 М  $\text{SnCl}_2$  (раствор 1) и анион-содержащего прекурсора 0.2 М  $\text{Na}_2\text{S}$  (раствор 2). Толщина пленок составляла от 0,1 до 0,7 мкм. В качестве подложки для осаждения пленок кестерита использовали наноструктурированный слой алюминия, полученный после удалением анодного пористого оксида алюминия.

Структурно-фазовые исследования показали наличие в свежесоздаденных пленках двух соединений  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  и  $\text{ZnS}$ . В результате химического взаимодействия во время отжига при температуре 250°C в течение 2 ч были получены пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . Использование наноструктурированного основания позволило повысить эффективность поглощения солнечного излучения. Установлено также влияние наноструктурированной подложки на эффективную ширину запрещенной зоны.

## **ПЛАЗМОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГРАФЕНОВОЙ ПОЛЕВОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ**

А.В. Фельшерук, А.Л. Данилюк

Динамическая проводимость, определяемая концентрацией носителей заряда и химическим потенциалом, также зависит от потенциала полевого электрода, что, в конечном счете, ведет к изменению параметров взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с графеновым слоем в полевой графеновой гетероструктуре. В данной работе представлены результаты расчетов коэффициентов распространения и поглощения электромагнитного излучения в терагерцевом диапазоне (1–15 ТГц) в зависимости от величины потенциала полевого электрода, температуры, толщины диэлектрика и плотности поверхностных состояний на границе раздела металл/диэлектрик. Уравнения, описывающие взаимодействие ЭМИ с графеном, выводятся из уравнений Максвелла, а дисперсионное соотношение, содержащее коэффициенты распространения и поглощения, из условия нетривиальности решений для этих уравнений. В свою очередь величина химического потенциала связана с величиной потенциала затвора и концентрацией носителей заряда уравнением электростатики гетероструктуры. Эти зависимости определяются с использованием интегрального уравнения для концентрации носителей заряда и электростатического уравнения для гетероструктуры графен/диэлектрик/металл. Рассчитаны частотные зависимости динамической проводимости, коэффициентов распространения и поглощения при варьировании потенциала полевого электрода, толщины диэлектрика и плотности поверхностных состояний, температуры. Установлено, что в зависимости от сочетания параметров гетероструктуры наряду с монотонными возникают также и немонотонные частотные зависимости коэффициентов распространения и поглощения. Полученные частотные зависимости коэффициентов распространения и поглощения ЭМИ показали, что в рассмотренном диапазоне частот ЭМИ может не только распространяться, но также и усиливаться за счет плазмонных колебаний.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ HSPICE ДЛЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

В.Т. Ханько

Непрерывное уменьшение геометрических размеров элементов ИМС, применение новых конструктивных решений и материалов при их производстве сопровождается появлением новых физических эффектов, механизмов генерации и транспорта носителей