

## МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ, ЗАКЛЮЧЕННЫХ В УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

А.В. Кухарев

Наноконпозиты на основе ферромагнетиков и углеродных нанотрубок (УНТ) привлекательны с практической точки зрения за счет своих уникальных физических свойств. В частности, интерес для исследования представляют структуры, состоящие из многослойных УНТ с осажденными в их внутреннюю полость ферромагнитными частицами [1]. Ввиду высокого предела прочности нанотрубок, измеряемого десятками гигапаскалей [2], после термического воздействия (нагрева/охлаждения) в такой структуре могут возникать магнитоупругие напряжения, достаточные для изменения магнитного состояния ферромагнитных частиц.

В работе посредством микромагнитного моделирования в пакете Nmag изучалось распределение намагниченности в цилиндрических частицах кобальта с гексагональной (*hcp*) и кубической (*fcc*) кристаллической решеткой, на которые действует сжимающее напряжение со стороны внешней среды (т.е. нанотрубки). Длина цилиндра 50–200 нм, диаметр – 10–20 нм. Для обеих решеток в отсутствие внешних воздействий магнитное состояние частиц определяется анизотропией формой, и является однодоменным, причем вектор намагниченности направлен параллельно оси цилиндра.

Показано, что радиальное сжатие цилиндра *hcp*-кобальта напряжением выше 5 ГПа приводит к переходу магнитного состояния цилиндра в неоднородное, причем вид распределения намагниченности определяется величиной напряжений и направлением гексагональной оси кобальта.

### Литература

1. Impact of CNT medium on the interaction between ferromagnetic nanoparticles / A.L. Danilyuk [et al.] // EPL. 2017. Vol. 117. P. 27007.
2. Ruoff R.S., Qian D., Liu W.K. Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions // C. R. Physique. 2003. Vol. 4. P. 993–1008.

## ТЕРМИЧЕСКОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ БЫСТРОГО ОКИСЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

С.К. Лазарук, А.В. Долбик, А.С. Сычевич, В.А. Лабунов

В настоящее время большинство информации хранится в цифровом виде на электронных накопителях. На основе энергетических свойств пористого наноструктурированного кремния могут быть разработаны разнообразные микроэлектромеханические системы (МЭМС) для средств самоуничтожения микросхем при несанкционированном доступе.

В работе исследовались энергетические свойства нанопористого кремния с межпоровым пространством, заполненным окислителем. При изготовлении пористого кремния особое внимание уделили пористым структурам, получаемым на основе кремниевых пластин р-типа с удельным сопротивлением кремния 10 Ом·см. Так как на данных пластинах образуется нанопористый кремний с диаметром пор от 2 до 50 нм. Анодирование проводили при плотности тока 25–75 мА/см<sup>2</sup> в 33 % растворе плавиковой кислоты (HF) и этанола. Для каждой плотности анодного тока было изготовлено по 3 образца с различным временем анодирования. В качестве окислителя применяли 20 % раствор перхлората натрия. Выбранный окислитель имеет большой энергетический выход реакции окисления и способность оставаться в порах после испарения раствора. Инициирование процессов горения и взрыва слоев пористого кремния, для определения условий разрушения кремниевой подложки, осуществляли путем помещения образцов на нагретую до 500 °С поверхность.

Атомы водорода, покрывающие пористый кремний, являются буферным слоем между атомом Si и молекулярным кислородом, который предотвращает взаимодействие кислорода с кремнием. При инициировании реакции окисления поверхностные Si-H связи разрываются, создавая оборванные связи Si, а водород удаляется с поверхности. В результате происходит

взаимодействие поверхностных атомов Si непосредственно с атомами кислорода из окислителя, приводящее и окислению наноструктур кремния.

Определены режимы формовки нанопористого кремния, его структурные параметры и условия термического инициирования реакций быстрого окисления, обеспечивающие разрушение кремниевого чипа. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении саморазрушающихся МЭМС для самоуничтожения микросхем, жестких дисков, CD, DVD в полупроводниковой и компьютерной технике.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ КАК ИСТОЧНИКОВ ЕДИНИЧНЫХ ФОТОНОВ**

С.К. Лазарук, А.А. Лешок, Ле Динь Ви, А.И. Мацкевич, А.С. Хиневиц, А.Г. Черных

Идеальный излучатель одиночных фотонов определяется как фотонный источник, в котором исключительно под действием управляющего сигнала излучается только один фотон. Для создания подобных источников света применяются одиночные излучатели (атомы, ионы, молекулы, квантовые точки, центры окраски), которые при возбуждении испускают одиночные фотоны. Эффективные однофотонные источники света являются ключевыми элементами систем квантовой криптографии и квантовых вычислений. Помимо этого они представляют значительный интерес для создания прецизионного спектрального оборудования и эталонов оптической мощности.

Нами разработано оптоэлектронное устройство на основе светодиодов из наноструктурированного кремния. Конструкция разработанного устройства состоит из двух контактов Шоттки, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Нижний слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки, образуя таким образом светодиодный элемент на основу наночастиц кремния. При подаче обратного смещения на диоды величиной 4В и выше их излучение регистрировалось интегрированными фотодетекторами. Минимальные размеры светоизлучающих элементов (порядка 5×5 мкм) и широкий диапазон рабочих напряжений светодиодов позволяют регистрировать оптические сигналы в диапазоне от мкВт/см<sup>2</sup> до Вт/см<sup>2</sup>. Нижний предел интенсивности светоизлучения соизмерим с мощностью излучения индивидуальных фотонов видимого диапазона, что позволяет рассматривать разработанную конструкцию как перспективную для ее использования в качестве генератора индивидуальных фотонов.

Разработанная система способна работать в гигагерцевом диапазоне частот, что достигается за счет миниатюризации рабочей площади светодиодов. Данная разработка открывает новые возможности для развития как кремниевой оптоэлектроники, так и квантовых систем.

### **МЕЖДУЧИПОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ И ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРПОЗЕРА ИЗ МИКРОКАНАЛЬНОЙ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ**

С.К. Лазарук, А.А. Лешок, Ле Динь Ви, А.И. Мацкевич, А.С. Хиневиц, А.Г. Черных

Оптические межсоединения осуществляют передачу сигнала от источника света через световод к фотодетектору, что обеспечивает высокую степень защиты передаваемой информации за счет локализации информационного потока внутри данной микросистемы.

Нами разработана система междучиповых оптических межсоединений на основе светодиодов из наноструктурированного кремния, микроканальной кремниевой пластины в качестве оптического интерпозера, выполняющего роль световода, и фотодетекторов. Минимальные размеры светоизлучающих диодов составляют несколько микрометров, что вместе с микронными размерами отверстий (диаметр микроканалов составляет 2–10 мкм) в кремниевых пластинах позволяют достичь рекордно высокой плотности передачи оптической информации. Проведена оценка потерь оптического сигнала после его прохождения через микроканалы оптического интерпозера. Величина потерь оптического сигнала составила