

А. М. СКВОРЦОВ, В. А. ЧУЙКО, ЛЕ ЗУЙ ТУАН, ФАМ КУАНГ ТУНГ

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МАССИВА НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ПРОЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Представлена лазерно-дифракционная методика формирования регулярного массива (решетки) кластеров кремния в системе кремний — диоксид кремния, основанная на процессе локального лазерного испарения вещества. Показано, что плотность кластеров кремния в массиве зависит от шага ячеек в металлической микросетке, которая использовалась для деления лазерного пучка. Определена пороговая мощность лазера, превышение которой сопровождается возникновением на окисленной поверхности кремния нанокластеров кремния в виде регулярной решетки. Показано, что при увеличении мощности лазера размер кластеров увеличивается, а вокруг кластеров появляются деформированные области; дальнейшее увеличение мощности приводит к увеличению размеров кластеров и площадей деформированных областей вплоть до их смыкания.

Ключевые слова: нанокластер, нанокристалл, наноэлектроника, лазерный способ кластеризации.

Введение. Достоинства кремния как одного из самых широко используемых материалов в современной полупроводниковой микроэлектронике и интегральной оптике хорошо известны и достаточно полно описаны в литературе. Поэтому исследования по созданию нанокластерных материалов на основе кремния, а также по формированию и модификации свойств наноструктур кремния наиболее актуальны. При этом особое внимание уделяется созданию больших массивов нанокристаллов кремния, расположенных в пленках SiO_2 с требуемой периодичностью, так как именно такие нанокластерные структуры могут быть эффективно использованы для создания устройств опто- и наноэлектроники.

Для формирования упорядоченных массивов квантовых точек в структурах соединений типа A_3B_5 используются методы, основой которых является самоорганизация на кристаллических поверхностях, и метод фасетования, в котором плоская кристаллическая поверхность перестраивается в периодическую структуру „холмов и долин“ [1].

При формировании упорядоченных массивов нанокластеров кремния в системе Si/SiO_2 применяются различные методы, в том числе наноструктурирование поверхности кремния с помощью литографии и лазерное микроstructuring. В работе [2] предложен способ формирования решетки нанокластеров кремния на структурированной поверхности подложки из монокристаллического кремния. Структурирование поверхности производится с помощью нанолитографии. В результате на поверхности подложки образуется регулярная сетка столбиков. Для завершения формирования структуры, представляющей собой решетку нанокластеров кремния в слое SiO_2 , производится термическое окисление подложки до образования замкнутых оболочек SiO_2 вокруг кластеров кремния и окончательный отжиг в инертной

атмосфере. Краткий обзор методов микроstructuring поверхности кремния с помощью лазера приведен в работе [3].

В настоящей статье предложен дифракционно-проекционный метод получения регулярного массива кластеров кремния в термической пленке SiO_2 с помощью оптической схемы проекционного лазерного облучения.

Микроstructuring поверхности кремния методом лазерного облучения. Благодаря интенсивному развитию лазерных технологий, за последние годы созданы лазеры с излучением, лежащим в глубоком УФ-диапазоне, и с длительностью импульсов вплоть до ультракоротких фемтосекундных. Применение таких лазеров позволяет создавать четкие структуры любого размера и формы в различных материалах. Изменяя энергию лазерного импульса и время воздействия, можно реализовать широкий диапазон режимов — от локального нагрева до строго дозированного удаления материала.

Метод структурирования поверхностей, основанный на процессе испарения вещества под воздействием лазерного излучения, отличается универсальностью, управляемостью и высокой производительностью. Для реализации этого метода могут быть использованы лазеры, создающие при фокусировке излучения плотность мощности, Вт/см^2 , достаточную для испарения материала [4]:

$$\bar{P} = \frac{2KT\sqrt{\pi}}{A\sqrt{\alpha\tau}} \approx 10^7 \dots 10^8,$$

где T — температура испарения материала, K — теплопроводность, α — температуропроводность, τ — длительность воздействия, A — поглощательная способность материала.

Толщина h испаренного слоя при импульсном воздействии с заданной плотностью мощности \bar{P} зависит от длительности воздействия τ . Величину h легко определить, считая, что вся подводимая к подложке мощность расходуется на испарение вещества:

$$h = V\tau = \frac{\bar{P}}{L}\tau,$$

где V — скорость испарения вещества (скорость движения границы раздела твердое тело — газ), L — удельная теплота испарения вещества.

Для микроstructuring поверхности кремния и формирования кластеров целесообразно использовать лазерное локальное испарение. Как следует из работы [5], процесс микроstructuring подложки сопровождается испарением атомов кремния и образованием твердых конических структур. В образовании кластеров кремния наряду с испаренными атомами участвуют и так называемые „лишние“ атомы кремния (рис. 1), которые образуются на границе Si/SiO_2 при термическом окислении кремния.

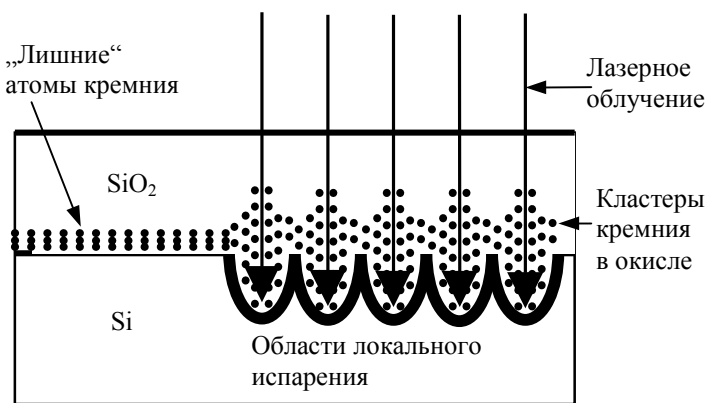


Рис. 1

Это связано с тем, что при сохранении неизменной площади межфазной границы (необходимое условие сопряжения двух твердых фаз) сопрягаются решетки кремния и диоксида (постоянные решеток соответственно 0,54 и 0,712 нм). В результате трансформация решетки кремния в решетку диоксида кремния вызывает появление „лишних“ атомов кремния, которые перераспределяются между кремнием и диоксидом, образуя в них соответствующие дефекты [6].

решетки кремния и диоксида (постоянные решеток соответственно 0,54 и 0,712 нм). В результате трансформация решетки кремния в решетку диоксида кремния вызывает появление „лишних“ атомов кремния, которые перераспределяются между кремнием и диоксидом, образуя в них соответствующие дефекты [6].

Дифракционно-проекционный метод. Мощность лазерного излучения, требуемая для испарения кремния на малой площади (пятне) подложки диаметром в доли микрометра или несколько нанометров, невелика. При характерном пространственном размере микроструктуры с радиусом r_0 порядка 100 нм потребуется мощность $P \geq \bar{P}S = 0,01 \dots 0,1$ Вт (где $S \approx \pi r_0^2$ — площадь светового пятна). По сравнению с мощностью лазеров, имеющих в настоящее время, эта мощность является очень малой. Поэтому можно разделить пучок лазера на несколько равных параллельных частей, чтобы одновременно можно было облучить большие площади. Для разделения пучка лазера использовалась микросетка, однако ее применение связано с проблемой, обусловленной дифракцией луча лазера. Поэтому после деления пучка необходимо применять фокусирующий объектив.

Схема формирования решетки кластеров кремния в диоксиде кремния приведена на рис. 2, где *a* — оптическая схема проекционного лазерного облучения; *b* — микросетка; *в* — распределение мощности излучения по площади объектива; *г* — решетка кластеров; l_1 — расстояние между сеткой и объективом, l_2 — расстояние между объективом и образцом, $D_{\text{л}}$ — диаметр лазерного пучка, $D_{\text{об}}$ — диаметр объектива, d_0 — сторона квадрата ячейки в сетке, d_g — диаметр пятна в решетке, h_1 — шаг микросетки, h_2 — шаг решетки.

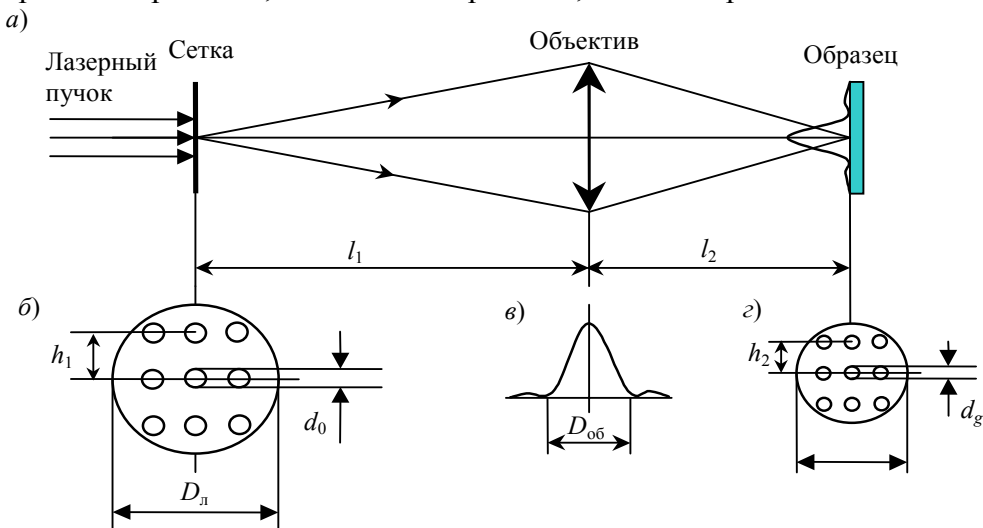


Рис. 2

Принцип работы оптической схемы проекционного лазерного облучения следующий: лазерный пучок мощностью P_0 и диаметром $D_{\text{л}}$ проходит через микросетку со стороной квадратной ячейки d_0 и разделяется на отдельные пучки. Количество пучков зависит от соотношения $D_{\text{л}}$ и d_g . Мощность пучка лазера, прошедшего через одно отверстие микросетки, вычисляется по формуле

$$P_1 = \frac{S_2}{S_1} P_0 = \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0, \quad (1)$$

где S_1 — площадь сечения лазерного пучка; S_2 — площадь пятна в зависимости от размера отверстия микросетки.

Здесь в формуле (1) вместо площади ячейки сетки приводится площадь пятна. Это объясняется следующим образом. После прохождения через микросетку разделенные лазерные пучки расходятся за счет дифракции, фокусируются объективом и проецируются на подложку. Если увеличение объектива большое и размеры отверстий на микросетке малые, то изображение отверстия микросетки можно считать точечным пятном. Диаметр объектива должен быть достаточным, чтобы „поймать“ все пучки, расположенные в центральной части исходного лазерного пучка. По теории дифракции [7] максимальная мощность лазерного пучка в его центральной части составляет $0,83 P_0$. Тогда мощность излучения, формирующего пятно на подложке,

$$P_2 = 0,83P_1 = 0,83 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0. \quad (2)$$

Распределение энергии в пятне на подложке считается гауссовым. Эта мощность P_2 может быть использована для локального плавления и локального испарения кремния.

Например, для лазера с длиной волны излучения $\lambda=157$ нм, при относительном отверстии объектива $A = 1:1$ график распределения энергии (E) на поверхности пятна представлен на рис. 3, а, а график зависимости диаметра пятна от долей энергии облучения (E'), рассчитываемой с использованием программы ZEMAX, — на рис. 3, б. Анализ графика (см. рис. 3, б) показывает, что при доле энергии облучения, составляющей 50 % от полной энергии, диаметр пятна $d_g \approx 100$ нм. Тогда мощность облучения этого пятна

$$P_3 = 0,5P_2 = 0,5 \cdot 0,83 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0 = 0,415 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0.$$

Следовательно, плотность мощности лазерного излучения, Вт/мм², формирующего это пятно, можно вычислить по формуле

$$\tilde{P} = \frac{P_3}{S_3} = 0,415 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0 / \pi r^2 = 0,415 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0 / \pi (5,10^{-5})^2 = 5,29 \cdot 10^7 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0, \quad (3)$$

где S_3 — площадь пятна на поверхности подложки.

По формулам (2) и (3) при заданных значениях диаметров $D_{\text{л}}$ и d_g (шаг сетки) можно вычислить мощность лазера, необходимую для формирования на поверхности кремния наноструктуры в виде массива пятен, в центре каждого из которых находится область испарения. Диаметр этой области выбирается исходя из распределения энергии (см. рис. 3, б).

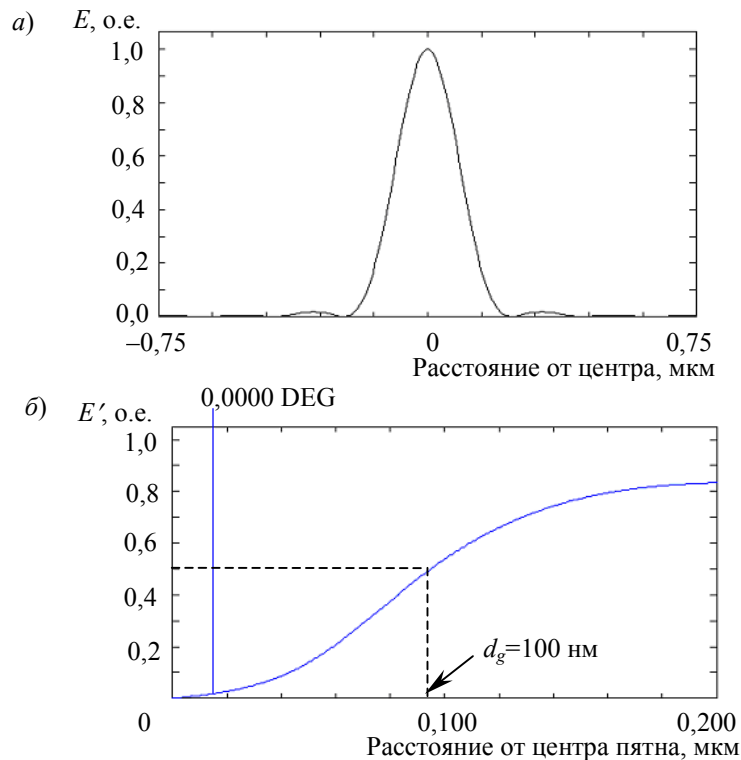


Рис. 3

Расстояние между пятнами зависит от коэффициента увеличения оптической системы, так как массив пятен представляет собой изображение микросетки, полученное проекционным способом. При достаточной мощности лазера размер пятен и расстояние между ними могут регулироваться шагом сетки и коэффициентом увеличения оптической системы.

Эксперимент. Обсуждение результатов. В качестве источника излучения был использован импульсный волоконный лазер типа YLP с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм и частотой импульсов $f=200$ Гц. Образцы представляли собой пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5 (100) с толщиной слоя окисла SiO_2 , равной 100 нм. Оптическая проекционная схема включала в себя объектив и микросетку, в качестве которой использовалась медная сетка с шагом 270 мкм (зазор 170 мкм, толщина нити 100 мкм). Коэффициент увеличения оптической системы составлял 24. Образцы облучались сканирующим лазерным пучком. Мощность лазера изменялась. Область сканирования составляла 3×3 мм².

Полученные образцы были исследованы оптическим методом. Для наблюдений и получения микрофотографий использовался оптический интерференционный микроскоп МИИ-4. Фотографирование производилось на цифровую камеру с высоким разрешением.

При облучении кремниевых подложек пучком лазера через микросетку была определена пороговая мощность $P_{\text{п}} = 122$ мВт, превышение которой сопровождалось возникновением на окисленной поверхности кремния нанокластеров кремния в виде регулярного массива.

На рис. 4 приведены фотоизображения структур областей облучения лазером с применением интерференционно-проекционной оптической системы при разных значениях мощности. На микрофотографиях в областях сканирования видны регулярные нанокластерные структуры, представляющие собой нанокластеры кремния в диоксиде кремния. Видно также, что размер кластеров зависит от значения мощности лазера. Когда мощность достигает значения, достаточного для испарения, в области облучения появляется „матрица кластеров“ (см. рис. 4, а), в которой расположение кластеров определяется расположением центров ячеек микросетки. При возрастании мощности лазера размер кластеров вначале просто увеличивается, затем увеличение сопровождается появлением деформированного слоя вокруг кластера. Дальнейшее увеличение мощности приводит к увеличению размеров кластеров и площади деформированных областей вокруг них (см. рис. 4, б, в). Наконец, деформированные области вокруг растущих кластеров смыкаются (см. рис. 4, г, д). Изображение области облучения, полученное без использования оптической проекционной системы, приведено на рис. 4, е.

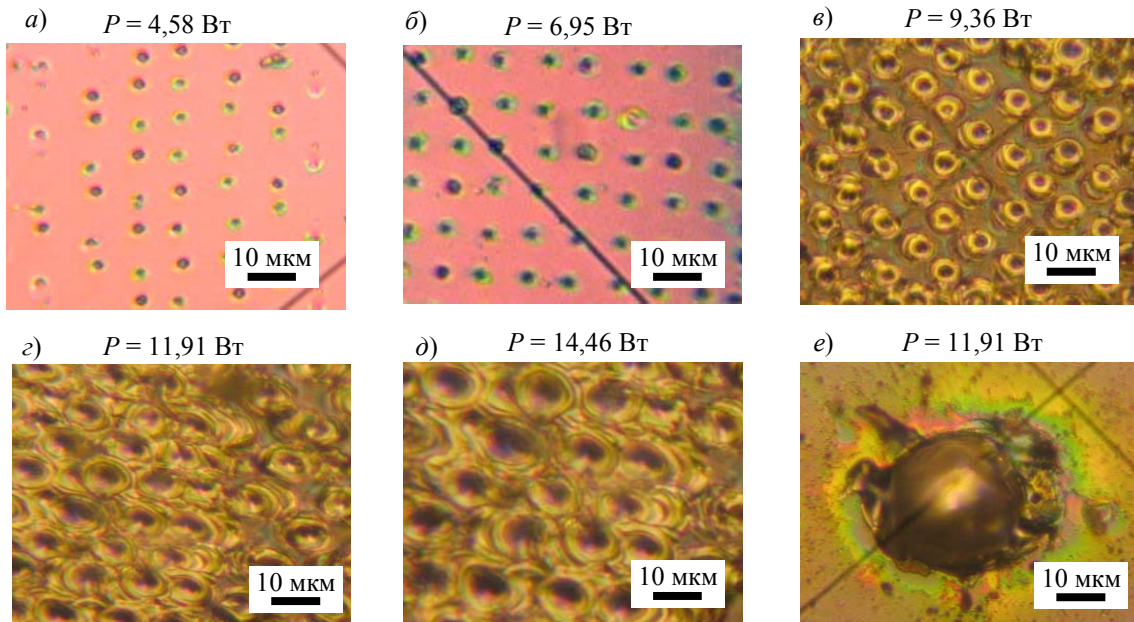


Рис. 4

Заключение. Использование рассмотренного в настоящей статье метода проекционного лазерного облучения позволило получить следующие основные результаты и сделать конкретные выводы:

— разработана лазерно-дифракционная методика формирования матрицы кластеров кремния в системе кремний — диоксид кремния;

— для деления лазерного пучка использована микросетка; показано, что плотность кластеров кремния в матрице зависит от шага ячеек в микросетке или от разрешающей способности дифракционной решетки;

— определена пороговая мощность лазера, превышение которой сопровождается возникновением на окисленной поверхности кремния нанокластеров кремния в виде регулярного массива;

— показано, что при увеличении мощности лазера размер кластеров увеличивается, затем вокруг кластеров появляются деформированные области; дальнейшее увеличение мощности приводит к увеличению размеров кластеров и площадей деформированных областей вплоть до их смыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32, № 1. С. 3—18.
2. Пат. № 2214359 РФ. Способ формирования решетки нанокластеров кремния на структурированной подложке / А. М. Скворцов, В. И. Соколов, Р. А. Халецкий, Е. Г. Фролова. Рег. 20.10.2003 г. Приор. от 05.09.2002 г.
3. Вейко В. П., Дышловенко С. С., Скворцов А. М. Лазерное микроструктурирование поверхности кремния // Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов: науч.-техн. сб. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. Ч. 2. С. 138—153.
4. Veiko V. P. Laser microshaping: Fundamentals, practical application, and future prospects // RIKEN Rev. 2001. N 32. P. 11—18.
5. Dolgaev S. I., Lavrishev S. V., Lyalin A. A. et al. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids // Appl. Phys. 2001. Vol. 73. P. 177—181.
6. Соколов В. И., Плотников В. В., Скворцов А. М. и др. Особенности термического окисления кремния, обусловленные несоответствием на межфазной границе // Изв. вузов. Электроника. 2002. № 5. С. 17—21.
7. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 4. Оптика. М.: Наука — Физмалит, 1998.

Сведения об авторах

- Альберт Матвеевич Скворцов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Владимир Анатольевич Чуйко** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий; ст. преподаватель
- Ле Зуи Туан** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Фам Куанг Тунг** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: quang_tung@yahoo.com

Рекомендована кафедрой проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию 27.11.08 г.