

УДК 538.9

*П. Б. Болдыревский, А. Г. Коровин,
С. А. Денисов, С. П. Светлов, В. Г. Шенгуров*

АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТОЛЩИНЫ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ИЗ СУБЛИМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ВАКУУМЕ ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Выращиваемые методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) слои Si однородны по толщине на небольшой площади (1–4 см²). Поэтому для дальнейшего развития и промышленного использования данного метода необходима реализация эпитаксиального роста на подложках достаточно большой площади. Целью данной работы являлось выявление условий осаждения слоев кремния с однородным распределением толщины по площади подложки диаметром 100–200 мм из сублимационных источников.

Материалы и методы. Для повышения степени однородности толщин эпитаксиальных слоев Si, осаждаемых в процессе сублимационной МЛЭ, рассматривается возможность применения нескольких идентичных источников Si. Сублимационный источник Si представляет собой прямоугольный брусок сечением 4×4 мм и длиной 120 мм, нагреваемый до рабочей температуры. Предложенная модель расчета распределения толщины эпитаксиального слоя Si основывается на том, что линейная плотность распределения частиц Si у поверхности подложки имеет вид, близкий к нормальному закону распределения.

Результаты. Получены экспериментальные и расчетные профили распределения толщины эпитаксиальных слоев кремния вдоль диаметра подложки. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментом. Показана возможность получения однородных слоев кремния при одновременном использовании трех сублимационных источников.

Выводы. Для получения заданной степени однородности эпитаксиального слоя необходимо применение системы нескольких сублимационных источников. В случае применения трех сублимационных источников определены геометрические и конструкционные параметры взаимного расположения подложки и сублимационных источников в вакуумной камере.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, сублимационный источник, однородность по толщине эпитаксиальных слоев кремния

*P. B. Boldyrevskiy, A. G. Korovin,
S. A. Denisov, S. P. Svetlov, V. G. Shengurov*

ANALYSIS OF THICKNESS UNEVENNESS OF THE EPITAXIAL SILICON LAYER DURING DEPOSITION FROM SUBLIMATION SOURCES IN A VACUUM

¹ Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ 2014/134 (проект № 3423), а также поддержана грантом Президента РФ (МК-7021.2015.2).

Abstract.

Background. Si layers, grown by sublimation molecular-beam epitaxy (MBE), are uniform in thickness on a small area (1–4 cm²). Therefore, for further development and industrial use of this method it is necessary to realize epitaxial growth on substrates of sufficiently large area. The aim of this work is to identify conditions of deposition of silicon layers with uniform thickness distribution over the area of a substrate with a diameter of 100–200 mm from sublimation sources.

Materials and methods. In order to increase thickness uniformity of epitaxial Si layers, deposited in the process of sublimation MBE, the possibility of using several identical source Si was observed. A sublimation Si source is a rectangular bar with cross-section of 4x4 mm and the length of 120 mm, heated to the working temperature. The proposed model for calculation of thickness distribution of the epitaxial Si layer is based on the fact that the linear density of distribution of Si particles at the surface of a substrate has a form close to the normal distribution law.

Results. The authors obtained the experimental and calculated profiles of thickness distribution of epitaxial silicon layers along with the substrate diameter. The calculation results agree well with the experiment. The possibility of obtaining uniform layers of silicon while using three sources of sublimation is showed.

Conclusions. In order to obtain the desired degree of uniformity of the epitaxial layer, it is necessary to use several sources of sublimation. For the case of three sublimation sources the authors identified geometric and structural parameters of the mutual arrangement of a substrate and the sublimation sources in a vacuum chamber.

Key words: molecular beam epitaxy, sublimation source, thickness uniformity of epitaxial silicon layers

Введение

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) кремния активно исследуется в связи с возможностью роста низкоразмерных структур и получения резкого профиля распределения легирующей примеси на границе слоев без перемешивания благодаря низкотемпературному процессу [1]. Для получения молекулярных потоков можно использовать сублимацию при нагреве пластины кремния проходящим током до высоких температур (~1380 °C). Пары Si из сублимационного монокристалла состоят в основном из одиночных атомов и полностью свободны от микрокапель и кластеров, в отличие от потока паров Si, создаваемого электронно-лучевым нагревом. Использование сублимации позволяет получать совершенные по структуре эпитаксиальные слои Si при достаточно низких температурах (~500 °C) в широком интервале скоростей роста (до 30 нм/мин) [2]. Сублимация позволяет выращивать и легированные слои, применяя в качестве источника монокристалл, легированный заданной примесью. При нагреве такого источника кремний сублимирует вместе с соответствующей долей примеси. Одним из важных параметров эпитаксиальных структур, определяющим возможность промышленного использования, является осаждение слоев с однородным распределением толщины и уровня легирования на подложках большой площади. Однако в большинстве установок, использующих сублимационные источники кремния, применяются подложки кремния нестандартной формы (в виде полосок) малых размеров, пригодные только для исследовательских целей.

Целью данной работы являлось выявление условий осаждения слоев кремния с однородным распределением толщины по площади подложки диаметром 100–200 мм из сублимационных источников.

1. Экспериментальная часть

Эпитаксиальный рост слоев кремния осуществлялся с использованием технологической установки, описанной в работах [3, 4], при температуре подложки $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении остаточных газов в вакуумной камере $\sim 10^{-8}$ Торр. В качестве подложек использовались стандартные подложки кремния с кристаллографической ориентацией (100) диаметром 100 мм.

Сублимационный источник Si представлял собой прямоугольный брусок сечением 4×4 мм и длиной 120 мм, вырезанный из слитка монокристаллического кремния. Нагрев источника до рабочих температур осуществлялся пропусканием через него постоянного электрического тока силой 40–50 А.

В процессе эпитаксии температура сублимационного источника достигала $1380\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего открывался экран, отделяющий источник от подложки и проводилось осаждение слоя кремния. Схема расположения источника и подложки в вакуумной камере представлена на рис. 1.

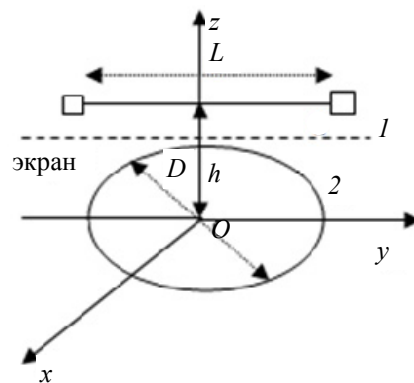


Рис. 1. Взаимное расположение сублимационного источника Si (1) и подложки (2) в вакуумной камере

Одной из основных технологических задач сублимационной МЛЭ является получение монокристаллических структур с минимальным разбросом толщин слоев по площади структуры, что особенно важно при использовании стандартных монокристаллических подложек кремния (дисков) достаточно большого диаметра (100–200 мм). Показано [5, 6], что один сублимационный источник обеспечивает необходимую однородность толщин эпитаксиальных слоев кремния (разброс толщин не превышает 10 нм) на площади не более 20×100 мм и распределение значений толщин в плоскости, перпендикулярной линии источника соответствует неоднородному распределению плотности частиц ростового вещества в сечении молекулярного пучка (диаметр подложки 100 мм; расстояние между источником и подложкой 20 мм). На рис. 2 представлены экспериментальные профили распределения толщин эпитаксиального слоя кремния, выращенного при центральном (вдоль диаметра подложки) расположении источника (рис. 2,а), а также при использовании двух идентичных сублимационных источников (рис. 2,б). Экспериментальные профили распределения толщин слоев кремния получали с помощью системы Talysurf CCI 2000 (интерферометр белого цвета). Погрешность измерений не превышала $\pm 1,0$ нм.

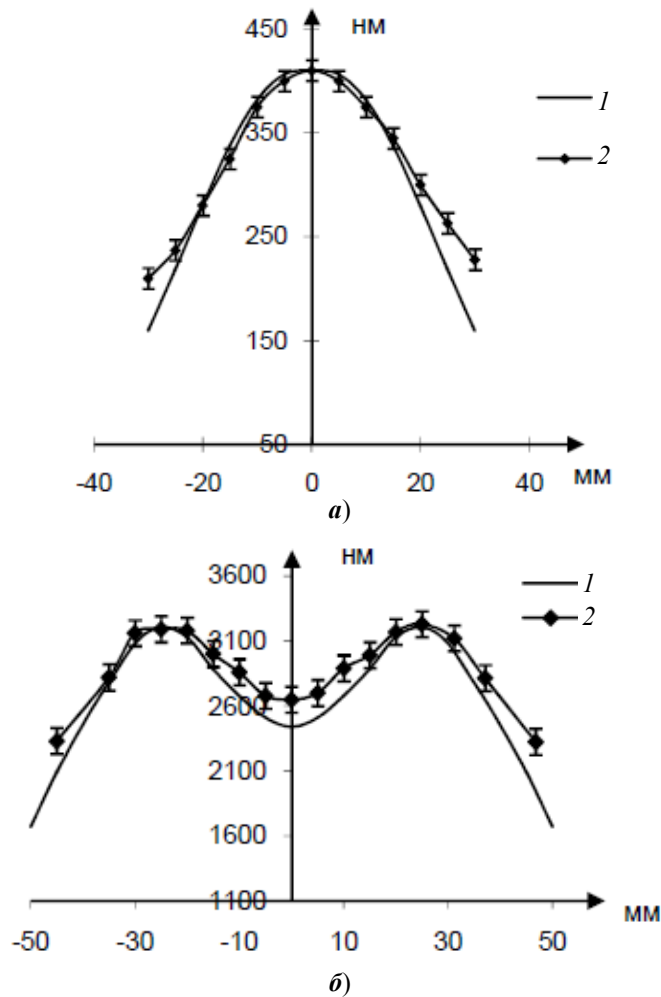


Рис. 2. Теоретические (1) и экспериментальные (2) профили распределения толщины слоев кремния вдоль диаметра подложки:
 а – центральный сублимационный источник; б – два источника

По данным электронографии и рентгеновской дифракции эпитаксиальные слои кремния имели монокристаллическую структуру при максимальной толщине (максимальной скорости роста 0,3 нм/с), что позволяет считать в данных условиях нелимитирующими поверхностные процессы упорядочивания и встраивания частиц. Вид профиля распределения скорости эпитаксиального роста будет соответствовать рис. 2 при условии ее стационарности.

2. Расчеты и обсуждение результатов

Для проведения необходимых расчетов параметров сублимационной МЛЭ будем использовать следующие положения и условия: сублимационный источник кремния считаем нитевидным ($L \gg a$, L – длина источника, a – ширина сублимирующей поверхности); он расположен параллельно диаметру подложки D вдоль оси OY . Для уменьшения краевых эффектов полагаем $L > D$ (в условиях эксперимента 120 и 100 мм соответственно). Расстояние между источником и подложкой – h (рис. 1). Приближение нитевидного ис-

точника позволяет рассматривать одномерные задачи, выделяя необходимое сечение молекулярного пучка.

Коэффициент конденсации, определяющий долю частиц молекулярного пучка, осаждающихся на растущей поверхности, будем считать близким к единице, что соответствует экспериментальным данным для указанной температуры подложки. Однородность распределения толщины эпитаксиальных слоев по оси OY , соответствующая требованиям технологических процессов микро- и нанoeлектроники, достигается выполнением условия $L > D$ и плоскопараллельностью источника и подложки.

Исходя из анализа экспериментальных данных (рис. 2), можно предположить, что линейная плотность распределения частиц ростового вещества в диаметральной сечении молекулярного пучка, перпендикулярном линии источника, у поверхности подложки (ось OX) имеет вид, близкий к нормальному закону распределения.

Сопоставляя выражения для плотности вероятности распределений Гаусса и Коши при максимальном значении их ординат, получим зависимость среднего квадратического отклонения σ от расстояния h между сублимационным источником и подложкой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} h. \quad (1)$$

Тогда с учетом (1) для расчета численными методами распределение толщины осажденного слоя может быть использовано выражение

$$H_0(x_i) = \frac{kt}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_0^{x_i/(\sqrt{\pi/2}h)} e^{-u^2/2} du - \int_0^{x_{i-1}/(\sqrt{\pi/2}h)} e^{-u^2/2} du \right], \quad (2)$$

где $x_i = i \frac{D}{2n}$ ($i = 1; 2; \dots; n$; n – число точек деления промежутка интегрирования $[0; D/2]$), k – размерный коэффициент, характеризующий параметры сублимационного источника; t – время осаждения.

Теоретические профили распределений толщин эпитаксиальных слоев приведены на рис. 2 (кривые 1). В случае применения двух источников расчеты проводились с использованием формулы (2) с учетом симметричного смещения линии каждого источника от центра подложки. Толщина слоя, осажденного на подложке, определяется суперпозицией одновременного воздействия двух источников. Результаты, представленные на рис. 2, показывают достаточно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Для повышения степени однородности толщин эпитаксиальных слоев, осаждаемых в процессе сублимационной МЛЭ рассмотрим возможности применения трех идентичных (с равными k , соответствующими температуре сублимации 1380 °С) источников, один из которых является центральным. Сублимационные источники расположены параллельно друг другу и плоскости подложки, вдоль оси OY .

В этом случае распределение толщины слоя осаждаемого вещества в зоне роста при сублимации из трех источников будет описываться выражением

$$H(x_i) = ktn \left[\int_0^{x_i} \Phi(x) dx - \int_0^{x_{i-1}} \Phi(x) dx \right]. \quad (3)$$

Разность в квадратных скобках (3) описывает вероятность попадания частицы осаждаемого вещества в заданный интервал;

$$\Phi(x_i) = \frac{1}{3\pi} \left[\frac{1}{h_0} e^{-\frac{x^2}{\pi h_0^2}} + \frac{1}{h} \left(e^{-\frac{(x+\Delta)^2}{\pi h^2}} + e^{-\frac{(x-\Delta)^2}{\pi h^2}} \right) \right] - \quad (4)$$

плотность вероятности распределения числа частиц в диаметральной сечении молекулярного пучка, формируемого тремя источниками; h_0, h – расстояния между центральным и боковыми источниками и подложкой соответственно; Δ – расстояние между источниками.

Для достижения необходимой однородности толщин эпитаксиальных слоев требуется оптимизация соответствующих параметров: расстояния между источниками Δ и расстояния h от источника до подложки (зоны осаждения), варьирование которых проводилось в среде Mathcad 15. Графические результаты численных расчетов распределений толщин эпитаксиальных слоев кремния, полученные с использованием выражений (3) и (4), представлены на рис. 3.

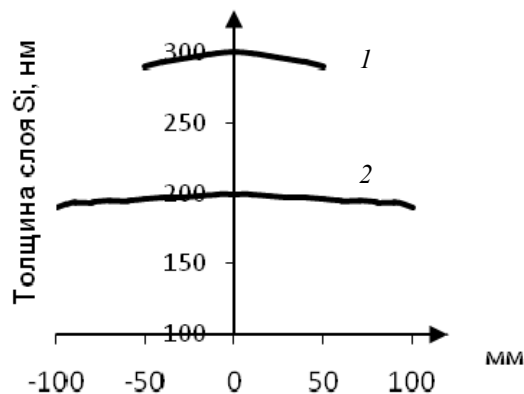


Рис. 3. Расчетные профили распределений толщин эпитаксиальных слоев кремния вдоль диаметра подложки для трех сублимационных источников ($k = 2 \cdot 10^{-5}$ нм/с, $t = 1800$ с): 1 – $D = 100$ мм, 2 – $D = 200$ мм

Максимальная степень однородности теоретических профилей распределений толщин слоев (разброс значений толщин не превышает 10 нм) достигается при следующих значениях параметров, характеризующих относительное расположение сублимационных источников и подложки в вакуумной камере: для подложек диаметром 100 мм: $h_0 = 50$ мм, $h = 30$ мм, $\Delta = 45$ мм (рис. 3, кривая 1); для подложек диаметром 200 мм: $h_0 = 52$ мм, $h = 50$ мм, $\Delta = 117$ мм (рис. 3, кривая 2). Таким образом, применение системы трех суб-

лимационных источников при соответствующей оптимизации параметров, характеризующих их расположение в вакуумной камере, является достаточно эффективным способом достижения необходимой степени однородности эпитаксиальных слоев кремния.

Список литературы

1. **Kasper, E.** Surface segregation determination by epitaxy temperature steps / E. Kasper, M. Oehme // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – Vol. 76. – P. 3573–3575.
2. **Кузнецов, В. П.** Метод сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии структур на основе кремния / В. П. Кузнецов, З. Ф. Красильник // *Физика и техника полупроводников.* – 2010. – Т. 44, № 3. – С. 413–417.
3. Установка для сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния / С. П. Светлов, В. Г. Шенгуров, В. А. Толочасов, Г. Н. Горшенин, В. Ю. Чалков // *Приборы и техника эксперимента.* – 2001. – № 5. – С. 137–140.
4. Установка и вакуумный метод эпитаксиального выращивания многослойных структур, содержащих слои Si, Ge и SiGe / В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов, С. П. Светлов, Д. В. Шенгуров // *Вакуумная техника и технология.* – 2011. – Т. 21, № 1. – С. 45–48.
5. **Mooney, P. M.** SiGe MOSFET structures on silicon-on-sapphire substrates grown by ultra-high vacuum chemical vapor deposition / P. M. Mooney, J. O. Chu, J. A. Ott // *J. Electron. Materials.* – 2000. – Vol. 29. – P. 921–927.
6. Расчет однородности толщин эпитаксиальных слоев, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии из сублимационного источника / П. Б. Болдыревский, А. Г. Коровин, С. А. Денисов, С. П. Светлов, В. Г. Шенгуров // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского.* – 2014. – № 2 (1). – С. 72–74.

References

1. Kasper E., Oehme M. *Appl. Phys. Lett.* 1990, vol. 76, pp. 3573–3575.
2. Kuznetsov V. P., Krasil'nik Z. F. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor physics and technology]. 2010, vol. 44, no. 3, pp. 413–417.
3. Svetlov S. P., Shengurov V. G., Tolomasov V. A., Gorshenin G. N., Chalkov V. Yu. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Experimental equipment and technology]. 2001, no. 5, pp. 137–140.
4. Shengurov V. G., Chalkov V. Yu., Denisov S. A., Svetlov S. P., Shengurov D. V. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya* [Vacuum equipment and technology]. 2011, vol. 21, no. 1, pp. 45–48.
5. Mooney P. M., Chu J. O., Ott J. A. *J. Electron. Materials.* 2000, vol. 29, pp. 921–927.
6. Boldyrevskiy P. B., Korovin A. G., Denisov S. A., Svetlov S. P., Shengurov V. G. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of LObachevsky State University of Nizhny Novgorod]. 2014, no. 2 (1), pp. 72–74.

Болдыревский Павел Борисович

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
математических и естественных
дисциплин, Нижегородский
государственный университет
имени Н. И. Лобачевского (Россия,
г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: bpavel2@rambler.ru

Boldyrevskiy Pavel Borisovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of sub-department
of mathematical and natural subjects,
Lobachevsky State University of Nizhny
Novgorod (23 Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Коровин Анатолий Геннадьевич

кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математических и естественных дисциплин, Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: bpavel2@rambler.ru

Korovin Anatoliy Gennad'evich

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, sub-department of mathematical and natural subjects, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

Денисов Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: denisov@nifti.unn.ru

Denisov Sergey Aleksandrovich

Candidate of physical and mathematical sciences, researcher, Research Institute of Applied Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

Светлов Сергей Петрович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: denisov@nifti.unn.ru

Svetlov Sergey Petrovich

Candidate of physical and mathematical sciences, senior staff scientist, Research Institute of Applied Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

Шенгуров Владимир Геннадьевич

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией электроники твердого тела, Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: denisov@nifti.unn.ru

Shengurov Vladimir Gennad'evich

Doctor of physical and mathematical sciences, head of solid state electronics laboratory, Research Institute of Applied Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

УДК 538.9

Анализ неравномерности толщины эпитаксиального слоя кремния при осаждении из сублимационных источников в вакууме / П. Б. Болдыревский, А. Г. Коровин, С. А. Денисов, С. П. Светлов, В. Г. Шенгуров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2015. – № 4 (36). – С. 93–100.