

06

Исследование однородности толщин слоев кремния, выращенных в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии из сублимационного источника

© П.Б. Болдыревский,¹ А.Г. Коровин,¹ С.А. Денисов,² С.П. Светлов,² В.Г. Шенгуров²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: bpravel2@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 20 марта 2014 г.)

Проведены экспериментальные исследования и теоретические расчеты распределения значений толщины эпитаксиального слоя по площади подложки для процесса осаждения из молекулярного пучка, формируемого в вакууме сублимационным источником. Полученные расчетные данные достаточно хорошо согласуются с экспериментом для молекулярно-лучевой эпитаксии кремния.

Введение

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) является основным технологическим процессом получения полупроводниковых наногетероструктур, являющихся основой для развития новых направлений электронной техники [1,2]. Достаточно высокие технологические результаты, полученные с использованием МЛЭ, реализуются благодаря стерильности и малой инерционности процесса, относительно низкой температуре эпитаксии, а также наличию в ростовой камере комплекса аналитического оборудования, предназначенного для контроля и анализа параметров подложки и формируемых эпитаксиальных слоев.

Однако существует ряд проблем, связанных с недостаточной изученностью механизма и кинетики роста эпитаксиальных слоев из молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме. Одной из таких задач является формирование монокристаллических структур с минимальным разбросом толщин слоев по площади структуры, что особенно важно для промышленных установок МЛЭ, где используются полупроводниковые подложки больших диаметров (арсенид галлия — 90 мм, кремний — 100–200 мм). В случае применения нескольких источников молекулярных пучков однородность по толщине достигается путем перекрытия максимумов распределений интенсивности пучков на подложке, используется также вращение подложки в процессе эпитаксиального роста [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований и модельных расчетов однородности толщин эпитаксиальных слоев кремния, полученных МЛЭ из молекулярных пучков, формируемых сублимационным источником [4]. Метод сублимационной МЛЭ успешно используется при разработке технологии получения гомо- и гетероэпитаксиальных структур кремния, включая структуры кремния на сап-

фире (КНС), а также наноразмерных структур твердых растворов SiGe [5,6].

Экспериментальная часть

Эпитаксиальный рост слоев кремния осуществлялся с использованием технологической установки, описанной в работах [7,8], при температуре подложки 700°C и давлении остаточных газов в вакуумной камере $\sim 10^{-6}$ Па. 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.

Температура сублимационного источника достигала 1380°C, после чего открывался экран, отделяющий источник от подложки, и проводилось осаждение слоев кремния. Схематическое расположение источника и подложки в вакуумной камере представлено на рис. 1. Расстояние между источником и подложкой составляло 20 мм.

В условиях эксперимента исследовалось распределение толщин эпитаксиальных слоев при осаждении из неподвижного источника, из двух идентичных неподвижных источников, расположенных на одинаковом расстоянии от центра подложки (расстояние между источниками 56 мм), из источника, совершающего равномерное поступательное движение в плоскости, параллельной плоскости подложки, вдоль оси *OX*. Экспериментальные распределения толщин представлены на рис. 2.

Экспериментальные профили распределения толщин слоев кремния получали с помощью системы Talysurf CCI 2000 (интерферометр белого цвета). Погрешность измерений не превышала ± 0.5 нм.

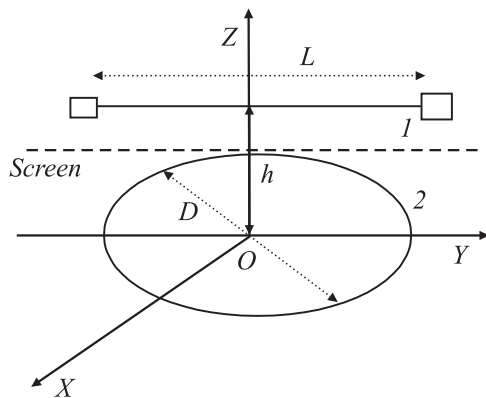


Рис. 1. Взаимное расположение сублимационного источника Si (1) и подложки (2) в вакуумной камере.

Расчеты и обсуждение результатов

Для проведения расчетов будем использовать следующие положения и экспериментальные данные: сублимационный источник кремния считаем нитевидным ($L \gg a$, L — длина источника, a — ширина сублимирующей поверхности), его движение может осуществляться равномерно вдоль диаметра подложки D , при этом L перпендикулярно D в плоскости XOY . Для уменьшения краевых эффектов полагаем $L > D$ (в условиях эксперимента 120 и 100 mm соответственно). Расстояние между источником и подложкой — h (рис. 1).

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

Коэффициент конденсации, определяющий долю частиц молекулярного пучка, осаждающихся на растущей поверхности, будем считать близким к единице. Однородность распределения толщины эпитаксиальных слоев по оси OY , соответствующая требованиям технологических процессов микроэлектроники, достигается выполнением условия $L > D$ и плоскопараллельностью источника и подложки.

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

Тогда для расчета численными методами распределение толщины слоя, осаждаемого из неподвижного

источника, можно использовать выражение

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

где $x_i = i^{3\sigma}/n$ ($i = 1, 2, \dots, n$, n — число точек деления промежутка интегрирования $[0, 3\sigma]$), k — размерный коэффициент, характеризующий параметры сублимационного источника, σ — среднее квадратическое отклонение, t — время осаждения.

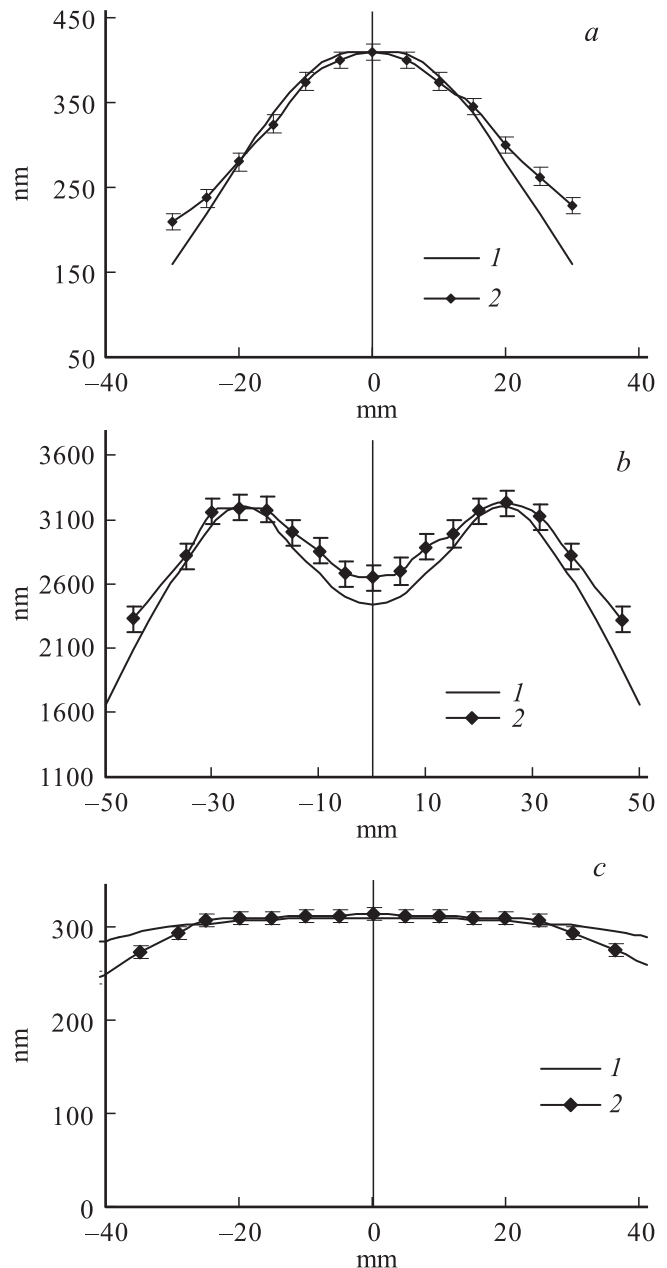


Рис. 2. Теоретические 1 и экспериментальные 2 профили распределения толщины слоев кремния вдоль диаметра подложки: *a* — неподвижный сублимационный источник, *b* — два источника, *c* — движущийся сублимационный источник.

Здесь учтено, что основной вклад в формирование эпитаксиального слоя вносит область молекулярного пучка шириной 6σ . Выражение в квадратных скобках описывает вероятность попадания частиц в данный интервал. Для подложек диаметром 100 mm, 6σ выбирается равным 120 mm.

Расчетные и экспериментальные распределения толщин представлены на рис. 2.

Сопоставляя стандартные распределения Гаусса и Коши [9], при максимальном значении их ординат, соответствующих центру подложки, получим выражение для оценки зависимости линейной плотности частиц в сечении молекулярного пучка ρ от расстояния между источником и подложкой h

$$\rho = \frac{m}{3\sqrt{2\pi} \cdot h}, \quad (2)$$

где m — полное число частиц в плоскости сечения молекулярного пучка (постоянная при неизменной температуре сублимационного источника), соответствующей эффективной ширине пучка в области подложки — 6σ , σ — среднее квадратическое отклонение нормального распределения.

Экспериментальный и теоретические профили распределений толщин эпитаксиальных слоев, полученных при использовании двух идентичных неподвижных источников, приведены на рис. 2, *b*. Представленные результаты показывают относительно невысокую эффективность использования такой технологической схемы для достижения однородности толщин слоев, однако подтверждают применимость предложенной теоретической модели, так как в данном случае, так же как и в случае применения одного источника, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных (рис. 2, *b*). Расчеты проводились с использованием формулы (1) с учетом постоянного смещения линии каждого источника от центра подложки. Толщина слоя, осажденного на подложке, определяется суперпозицией одновременного воздействия двух источников.

При циклическом (без учета инерционности при изменении направления движения) равномерном движении сублимационного источника вдоль поверхности подложки для диаметрального распределения толщины осажденного слоя Si получим следующее выражение:

$$H(x_i) = \frac{kt}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_0^{x_i/\sigma} e^{-u^2/2} du + \int_0^{x_n/\sigma} e^{-u^2/2} du \right]. \quad (3)$$

Экспериментальная зависимость толщины $H(x)$ эпитаксиального слоя кремния от координаты x при $k = 0.18$ nm/s, $h = 20$ mm, $t = 1800$ s с представлена на рис. 2, *c*, где наблюдается выраженное плато размером 60 mm, разброс значений толщин на длине которого не превышает 5 nm.

При сопоставлении расчетной и экспериментально полученной кривых $H(x)$ с учетом погрешности измерений

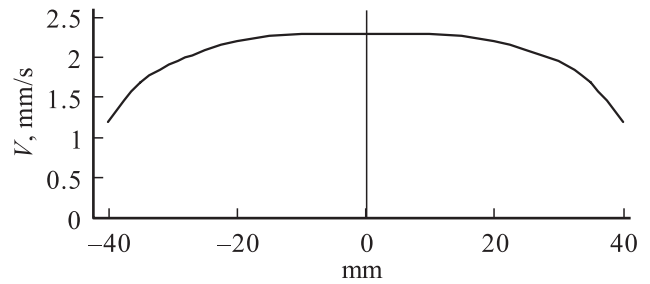


Рис. 3. Расчетная зависимость скорости движения источника от координаты подложкодержателя.

наблюдается достаточно хорошее соответствие данных в области поверхности осаждения кремния, соответствующей плато (рис. 2, *c*).

Некоторое расхождение экспериментальных и теоретических данных на краях распределений, по-видимому, обусловлено приближением нитевидного источника.

Улучшение однородности толщины эпитаксиального слоя по всему диаметру используемой подложки можно достичь путем соответствующего изменения скорости движения источника. Зафиксировав в (3) толщину $H(x_i)$ осаждаемого слоя, положив ее равной $H_0 = \text{const}$ и приняв $t = \frac{3\sigma}{v(x_i)}$ ($v(x_i)$ — скорость движения источника), получим

$$v(x_i) = \frac{k}{\sqrt{2\pi}} \frac{3\sigma}{H_0} \left[\int_0^{x_i/\sigma} e^{-u^2/2} du + \int_0^{x_n/\sigma} e^{-u^2/2} du \right]. \quad (4)$$

График зависимости скорости движения источника от координаты представлен на рис. 3. Здесь $H_0 = 10$ nm, что соответствует одному проходу источника над поверхностью подложки (длина пути 120 mm).

Таким образом, для достижения максимальной степени однородности толщин эпитаксиальных слоев необходима техническая реализации закона изменения скорости движения сублимационного источника относительно подложки в соответствии с выражением (4). Другим способом достижения необходимой однородности осаждаемых слоев является соответствующее увеличение длины пути равномерного циклического движения источника, для подложек диаметром 100 mm ее расчетное значение должно составлять не менее 220 mm.

Заключение

Рассмотрены вопросы повышения степени однородности по толщине эпитаксиальных слоев кремния, формируемых в процессе сублимационной МЛЭ на подложках большого диаметра. Экспериментальные и расчетные данные показывают, что для решения этой задачи достаточно эффективна технологическая схема с использованием движущегося сублимационного источника. Оптимизация закона движения источника позволит достичь

высокой степени однородности толщин слоев. В случае использования технического решения, связанного с увеличением длины пути циклического движения источника, может возникнуть необходимость соответствующего изменения конструкции вакуумной камеры.

Список литературы

- [1] *Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры* / Под ред. Л. Ченга, К. Плога. М.: Мир, 1989. 580 с.
- [2] *Алфёров Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В., Копьев П.С.* и др. // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–15.
- [3] *Болховитянов Ю.Б., Гутаковский А.К., Дерябин А.С., Соколов Л.В.* // ФТТ. 2008. Т. 50. С. 1783–1786.
- [4] *Постников В.В., Овсянников М.И., Логинова Р.Г.* и др. // Докл. АН СССР. 1967. Т. 175. № 4. С. 817–818.
- [5] *Шенгуров В.Г., Павлов Д.А., Светлов С.П.* и др. // ФТТ. 2005. Т. 47. С. 86–89.
- [6] *Шенгуров В.Г., Чалков В.Ю., Денисов С.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37 Вып. 13. С. 24–30.
- [7] *Светлов С.П., Шенгуров В.Г., Толмасов В.А.* и др. // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 5. С. 137–140.
- [8] *Шенгуров В.Г., Чалков В.Ю., Денисов С.А.* и др. // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21. № 1. С. 45–48.
- [9] *Венцель Е.С., Овчаров В.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.