

©1994 г.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СУБЛИМИРОВАННОЙ ЭПИТАКСИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ

*М.М.Аникин, А.Л.Сыржин, В.Е.Челноков*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 2 февраля 1994 г. Принята к печати 9 февраля 1994 г.)

Обсуждены вопросы, связанные с одной из наиболее известных технологий роста эпитаксиальных слоев карбида кремния — сублимационной эпитаксией. Рассмотрены достоинства и недостатки этого метода с точки зрения получения структурно совершенных слоев заданной концентрации, в том числе вопрос снижения уровня легирования эпитаксиальных слоев фоновой примесью. Предложены пути решения существующих в этой области проблем.

Карбид кремния — широкозонный полупроводник с уникальным сочетанием физико-химических свойств, позволяющим реализовать на его основе практически все известные типы полупроводниковых приборов, сохраняющих при этом функциональные свойства в экстремальных условиях (высокие температуры, повышенная радиация, агрессивные средства и т.п.). Этим объясняется повышенный интерес к разработкам приборов на основе карбида кремния во всем мире. Современный уровень развития технологии выращивания монокристаллов, структур с эпитаксиальными слоями, а также формирования приборов позволяет говорить о выходе электроники на базе карбида кремния на уровень коммерческого использования.

Основным элементом технологии карбида кремния является выращивание эпитаксиальных слоев с контролируемым уровнем легирования электрически активными примесями. В настоящее время наиболее известны 3 типа технологий эпитаксиального выращивания слоев карбида — это жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) [1], химическое осаждение из газовой фазы (ГФЭ) [2] и сублимационная эпитаксия (СЭ) [3]. ЖФЭ карбида кремния не получила широкого распространения из-за целого ряда ограничений как технического так и фундаментального характера. Существуют, например, проблема «тигля», проблема очистки расплавов от примесей и т.п. Наиболее интенсивно в настоящее время развивается ГФЭ карбида кремния. Этот метод наиболее технологичен и позволяет контролировать уровень легирования донорами и акцепторами в процессе роста в широких пределах. Этим методом получены

наиболее чистые эпитаксиальные слои с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a < 10^{14} \text{ см}^{-3}$  [2]. Однако в рамках этого метода пока не разрешена в полной мере проблема границы эпитаксиального слой-подложка, что приводит к высокой плотности дефектов в эпитаксиальных слоях и снижает электрофизические параметры приборных структур. СЭ карбида кремния впервые использована Чангом [4] для формирования  $p$ - $n$ -переходов методом Лели [5]. Этот метод роста практически не поддается контролю и не получил какого-либо распространения.

Наиболее известными сублимационными методами являются сэндвич-метод, предложенный в [6], и его модификации [7,8]. Основная идея сублимационного сэндвич-метода (ССМ) заключается в максимально близком расположении источника паров и подложки, что позволяет локализовать зону кристаллизации и повысить скорость роста. Перенос паров в зоне роста осуществляется в условиях градиента температуры. Изменение величины этого градиента позволяет контролировать скорость роста. Первые эпитаксиальные слои, полученные ССМ, имели высокую плотность дислокаций, параллельных направлению роста, а также значительную толщину переходной области подложка-слой (до нескольких микрометров). Кроме того, концентрация фоновой примеси (азота) составляла в этих слоях не менее  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Введение операции сублимационного травления подложки *in situ* перед процессом роста эпитаксиального слоя позволило решить проблему снижения толщины переходной области [7]. Модификация ССМ [8] путем открытия ростовой ячейки позволила достигнуть уровня концентрации фоновой примеси  $N_d - N_a$  порядка  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  и ниже [3]. Снижение уровня легирования фоновой примесью в открытом варианте ССМ достигается за счет повышения скорости роста путем проведения процесса в вакууме и применения специального источника, содержащего поликристаллический SiC, насыщенный кремнием. Состав и конструкция источника выбираются таким образом, чтобы давление паров кремния в зоне роста поддерживалось на уровне его равновесного значения над SiC при температуре роста и могло варьироваться в широких пределах. Этот метод позволил получить чистые эпитаксиальные слои 6H- и 4H-SiC очень высокого качества, а также резкие асимметричные  $p$ - $n$ -переходы и многослойные эпитаксиальные структуры. На основе таких структур были сформированы разнообразные приборы [3].

До сих пор не существует физической модели, дающей количественное описание процессов легирования при сублимационной эпитаксии. Это связано с необходимостью учитывать большое число факторов, оказывающих влияние на процессы легирования, а также с трудностью точного поддержания всех параметров процесса роста в экспериментах. Однородно легированные эпитаксиальные слои, изготовленные нами ССМ в открытой ростовой системе имели концентрацию нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a = (5 \cdot 10^{16} \div 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3})$  и толщину до 10 мкм. В некоторых случаях  $N_d - N_a$  было несколько ниже (вплоть до  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), однако точные причины этого не были установлены. Вместе с тем экспериментальные данные позволяют утверждать, что остаточное давление в вакуумной камере оказывает существенное влияние на уровень легирования эпитаксиального слоя. Так, при остаточных

давлениях в камере порядка  $10^{-5}$  Торр уровень легирования эпитаксиальных слоев находится в пределах  $(0.8 \div 6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , при снижении остаточного давления на порядок величина  $N_d - N_a$  снижается до  $(1 \div 8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а дальнейшая откачка до давления около  $10^{-7}$  Торр приводит к получению эпитаксиальных слоев с концентрацией доноров в пределах  $(0.5 \div 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Другими важными факторами, влияющими на процессы легирования, являются глубина сублимационного травления *in situ* и скорость роста эпитаксиального слоя. Так, большая глубина травления приводит к неоднородности легирования по толщине эпитаксиального слоя. Аналогичные последствия вызывает увеличение времени роста или снижение скорости. Более детальные исследования влияния основных параметров процессов ССМ на легирование эпитаксиальных слоев могут позволить получать структуры с контролируемым уровнем и профилем легирования.

Для реализации сублимационного травления *in situ* и для поддержания давления паров кремния в ростовой ячейке на равновесном уровне необходимо иметь возможность поддерживать и изменять величину и направление температурного градиента в процессе роста. Эта возможность определяется выбранным способом нагрева и конструктивным исполнением системы нагрева. Обычно используют индуктивный нагрев ростовой ячейки в высокочастотном (ВЧ) электромагнитном поле. В таком случае величина и направление температурного градиента регулируются путем перемещения индуктора относительно ростовой ячейки или наоборот. При этом из-за жестких условий согласования ВЧ генератора с нагрузкой ячейка должна иметь строго определенный размер и конструкцию, которые ведут к большой теплостойкости ячейки и, как следствие, длительному установлению температурных полей. Если это время сравнимо с длительностью процесса эпитаксии, то точную воспроизводимость температурных условий от процесса к процессу обеспечить практически невозможно. Использование электронно-лучевого нагрева ростовой ячейки позволяет снизить инерционность конструкции и проводить процесс в установившихся температурных условиях. Кроме того, электронный нагрев позволяет легко регулировать направление и величину температурного градиента в ростовой ячейке без перемещения элементов конструкции. Практически отсутствуют ограничения на размер и количество одновременно обрабатываемых структур.

В настоящее время эпитаксиальные слои, полученные ССМ в открытой ростовой системе, с кристаллографической точки зрения являются наиболее высококачественными [9]. Решение проблемы снижения уровня легирования фоновой примесью (азотом) в процессах сублимационной эпитаксии, в частности ССМ, позволит использовать эти методы при создании класса приборов, наиболее полно реализующих достоинства карбида кремния, именно высокотемпературных силовых приборов. Представляются возможными следующие пути решения этой проблемы: 1) дальнейшее снижение замкнутости ростовой ячейки; 2) глубокая очистка материала источника и арматуры; 3) применение вакуумного шлюзования при загрузке и разгрузке ростовой ячейки с целью избежать контакта графитовой арматуры с воздухом; 4) применение арматуры, свободной от графита [10]; 5) проведение процессов роста в условиях более низкого остаточного давления в вакуумной камере.

Таким образом, пути развития СЭ связаны, на наш взгляд, с решением задач управления легирования эпитаксиальных слоев при сохранении и повышении их качества, а также с увеличением производительности метода. При этом наиболее перспективен ССМ в открытой ростовой ячейке с электронным нагревом.

Настоящая работа частично выполнена при поддержке Министерства обороны США.

#### Список литературы

- [1] В.А. Дмитриев, П.А. Иванов, И.В. Коркин, Я.В. Морозенко, И.В. Попов, Т.А. Сидорова, А.М. Стрельчук, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **10**, 1053 (1984).
- [2] D.J. Larkin, P.G. Neudeck, J.A. Powell, L.G. Matus. Proc. ICSCRM-93 (Washington DC, USA, 1993).
- [3] M.M. Anikin, P.A. Ivanov, A.A. Lebedev, S.N. Pytko, A.M. Strel'chuk, A.L. Syrkin In: *Semiconductor interfaces and microstructures*, ed. by Zh.C. Feng (World Scientific Publishing Co., Singapore, 1992) p. 280.
- [4] H.C. Chang. *Semicond. Prod.*, **3**, 23 (1960).
- [5] J.A. Lely. *Ber.Deut. Keram. Ges.*, **32**, 299 (1955).
- [6] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, M.G. Ramm, A.D. Roenkov. *Cryst. Res. Techn.*, **14**, 729 (1979).
- [7] А.О. Константинов, Е.Н. Мохов. Письма ЖТФ, **7**, 247 (1981).
- [8] М.М. Аникин, В.А. Дмитриев, Н.Б. Гусева, А.Л. Сыркин. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **20**, 1768 (1984).
- [9] S. Tyc. *Proc. ICSCRM-93* (Washington DC, USA, 1993).
- [10] A.O. Konstantinov, P.A. Ivanov. *Proc. ICSCRM-93* (Washington DC, USA, 1993).

Редактор Л.В. Шаронова

### Prospects of Development of Sublimation Epitaxy of Silicon Carbide

*M.M. Anikin, A.L. Syrkin and V.E. Chelnokov*

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021, St. Petersburg, Russia