УДК 621.382

© В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, А. В. Сахаров, А. Ф. Цацульников, В. М. Устинов

РЕАКТОРЫ ДЛЯ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Представлен анализ ситуации, сложившейся на рынке оборудования для МОС-гидридной эпитаксии соединений на основе нитрида галлия, и видение проблем и открывающихся возможностей. Даны практические результаты работы по реализации подхода авторов к созданию МОС-гидридного оборудования.

Кл. сл.: нитриды III группы, МОС-гидридная эпитаксия, технологическое оборудование, LED, HEMT

ВВЕДЕНИЕ

МОС-гидридная эпитаксия (МОГФЭ) была изобретена Х. Манасевитом в 1968 г. для решения конкретной практической задачи — создания эпитаксиальных структур "арсенид галлия на сапфире" для аэрокосмических применений [1]. Эта технология оказалась хорошо совместима с условиями реального промышленного производства и в настоящее время доминирует в производстве гетероструктур для множества различных применений: многопереходных фотовольтаических преобразователей, светодиодов, лазеров для волоконно-оптических линий связи. Она успешно конкурирует с молекулярно-пучковой эпитаксией в производстве гетероструктур для транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) и мощных лазеров на основе соединений III-As и является единственной эпитаксиальной технологией в производстве любых приборов на основе III-N соединений. Соответственно велико значение МОС-гидридной эпитаксии и в прикладных научных исследованиях.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ МОГФЭ. ПРОБЛЕМЫ

Еще с первых лет развития МОГФЭ стала очевидна необычайно высокая зависимость конечных результатов от особенностей конструкции реактора. Технологии, разработанные для одного реактора, с трудом переносятся в реакторы других конструкций, а сами реакторы плохо поддаются масштабированию. Эта проблема в первую очередь вызвана сложными химическими реакциями между исходными соединениями (прекурсорами), происходящими в газовой фазе, еще до достижения ими поверхности подложки.

Приблизительно до середины 80-х гг. прошлого века как исследователи, так и промышленность использовали МОГФЭ-реакторы собственной разработки. Однако в начале 80-х появился ряд машиностроительных компаний, постепенно превративших МОС-гидридные установки в стандартный продукт. В течение последних 20–25 лет на рынке такого оборудования сложилась ситуация практически классической дуополии: более 90 % рынка контролируется компаниями AIXTRON (Германия) и Veeco (США, в конце 2003 г. приобрела бизнес по производству МОС-гидридных реакторов у компании Emcore). Поначалу стандартизация эпитаксиального оборудования и сама возможность приобретения его у профильных производителей оказали крайне позитивное влияние на развитие МОГФЭ: увеличилось число научных коллективов, облегчилось перекрестное распространение новых идей и их внедрение в производство. Однако в дальнейшем диктат производителей начал оказывать удушающее воздействие на отрасль.

Наиболее остро проблема стоит в области МОС-гидридной эпитаксии III-N соединений. Эти материалы все еще можно рассматривать как относительно новые, их технология изучена далеко не до конца. Несмотря на массовое производство приборов на их основе, потенциал этих материалов далеко не исчерпан, большая часть исследований в области МОГФЭ по-прежнему сконцентрирована на III-N материалах. За последние 20 лет создано примерно 5–6 поколений реакторов для МОС-гидридной эпитаксии III-N. Деление на эти поколения весьма произвольно, однако общий вектор развития прослеживается очень четко: конструкции реакторов существенно улучшаются, устраняются первоначальные ошибки, внедряется новое понимание механизмов МОС-гидридной эпитаксии III-N соединений. Однако параллельно

Рис. 1. Динамика развития вместимости МОС-гидридных реакторов для III-N соединений.
Короткие горизонтальные линии соответствуют загрузке подложек разного диаметра

увеличиваются не только максимальные, но и минимальные размеры реакторов в пределах поколения (рис. 1). В результате на рынке практически отсутствуют реакторы современной разработки и при этом малой вместимости. Редкие исключения на самом деле таковыми не являются, однако доказательство этого факта выходит за рамки статьи с ограниченным объемом.

Очевидно, что сложившаяся ситуация крайне негативно сказывается на научных исследованиях и разработках. Проведение НИОКР с использованием реакторов малого объема затруднено их ограниченными в силу моральной старости возможностями и существенными проблемами переноса результатов на иные по геометрии современные реакторы большого объема. Альтернативой является проведение НИОКР сразу в больших реакторах, но его стоимость оказывается непомерно высокой. Аналогичные проблемы возникают у малых компаний и при производстве приборов класса high-end, специальных и заказных эпитаксиальных структур.

Считается, что сформировавшийся вектор развития МОГФЭ-реакторов, подразумевающий непрерывное увеличение их размеров при сохранении базовых концепций, стратегически ориентирован на массовое производство. Однако даже это утверждение представляется неоднозначным. Весьма проблематична применимость развиваемых базовых концепций реакторов для вероятных сценариев развития III-N технологии в будущем: перехода на сапфировые или кремниевые подложки диаметром 200–300 мм или на подложки из объемного GaN или AlN. Все существующие на данный момент базовые концепции реакторов малоприспособлены для таких технологий в силу присущих им проблем принципиального характера.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Наш анализ возможных альтернативных концепций реакторов показал, что в случае реализации малой длительности эпитаксиального процесса, применение одноподложечных МОС-гидрид-

ных эпитаксиальных установок перспективно даже для массовых III-N приборов с учетом материальных и временных затрат на осуществление полного цикла "разработка—производство". Для high-end, специальных и заказных приборов такие установки имеют абсолютно неоспоримые преимущества по сравнению с доминирующими сегодня на рынке многоподложечными. В статье представлены наши первые наработки, ориентированные на развитие данного подхода.

Нами создан экспериментальный образец МОС-гидридной установки Dragon-125 с реактором, предназначенным для выращивания III-N эпитаксиальных структур на подложке диаметром 100 мм (или трех диаметром 2 дюйма). Установка имеет металлический горизонтальный реактор с индукционным нагревом и позволяет выращивать эпитаксиальные структуры в диапазоне давлений 100–1600 мбар. Тщательная с использованием компьютерного моделирования в компании Софт-Импакт оптимизация конструкции реактора позволила достичь очень высоких скоростей роста GaN, AlN, AlGaIn и уменьшить длительность переходных этапов при росте сложных многослойных гетероструктур. В результате полная (от загрузки до разгрузки) продолжительность эпитаксиального процесса была сокращена в несколько раз по сравнению с типичными для стандартных

реакторов и составила 2 ч 20 мин–2 ч 45 мин для светодиодных гетероструктур на сапфировых подложках [2] и 1 ч 35 мин–2 ч 20 мин для HEMT-структур на подложках SiC. Оптимизированная конструкция реактора в сочетании с многоточечным измерением скорости роста и изгиба эпитаксиальной пластины в реальном времени позволили достичь высоких значений однородности толщины и электрофизических свойств эпитаксиальных структур (рис. 2).

В 2014–2016 гг. в созданном реакторе проводились многочисленные эксперименты по выращиванию различных эпитаксиальных структур на основе III-N соединений. В частности, выращивались эпитаксиальные структуры для мощных HEMT на SiC-подложках [3, 4]. Кроме того, был разработан ряд нестандартных технологий, расширяющих спектр конструкций реализуемых эпитаксиальных структур:

- осаждение пассивирующих Si_3N_4 покрытий непосредственно в эпитаксиальном реакторе в продолжение единого эпитаксиального процесса;
- выращивание HEMT-структур с барьером InAlN [5];
- легирование углеродом с использованием пропана в качестве источника углерода [6];

а

б

Рис. 2. Карты распределения толщины GaN на сапфировой подложке (а) и слоевого сопротивления канала III-N HEMT-структуры на SiC подложке (б). Диаметры подложек 100 мм

- селективная эпитаксия тонких сильнолегированных подконтактных областей [7];
- выращивание легкоотделяемых от подложки композитных графен — III-N-структур в едином эпитаксиальном процессе [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы нами создан экспериментальный образец III-N МОС-гидридного реактора нового поколения и совокупность базовых технологий для выращивания в нем эпитаксиальных структур для различных электронных и оптоэлектронных приборов. Он может послужить не только основой для разработки отечественной установки для МОС-гидридной эпитаксии, но и базой для развития принципиально нового направления в дизайне МОС-гидридных реакторов — компактных одноподложечных с малой продолжительностью эпитаксиального цикла.

Оптимизация эпитаксиального процесса на созданной установке частично проводилась в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manasevit H.M. Single-crystal gallium arsenide on insulating substrates // Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 12, no. 4. P. 156. Doi: 10.1063/1.1651934.
2. Лундин В.В., Давыдов Д.В., Заварин Е.Е., Попов М.Г., Сахаров А.В., Яковлев Е.В., Базаревский Д.С., Талалаев Р.А., Цацульников А.Ф., Мизеров М.Н., Устинов В.М. МОС-гидридная эпитаксия III-N светодиодных гетероструктур с малой длительностью технологического процесса // ПЖТФ. 2015. Т. 41, № 5. С. 9–17.
3. Великовский Л.Э., Сим П.Е., Поливанова Ю.Н., Шишкин Д.А., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. Разработка мощных GaN транзисторов L-S-C диапазона // Труды 10-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы", С.-Петербург, 23–25 марта 2015. С. 131.
4. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е. и др. Рост НЕМТ гетероструктур AlGaIn/GaN на подложках SiC отечественного производства // Труды 10-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы", С.-Петербург, 23–25 марта 2015. С. 129.
5. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Яговкина М.А., Сахаров А.В., Усов С.О., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Булашевич К.А., Карпов С.Ю., Устинов В.М. Влияние параметров гетероструктур AlN/GaN/AlGaIn и AlN/GaN/InAlN с двумерным электронным газом на их электрофизические свойства и характеристики транзисторов на их основе // ФТП. 2016. Т. 50, № 10. С. 1401–1407.
6. Lundin W.V., Sakharov A.V., Zavarin E.E., Kazantsev D.Yu., Ber B.Ya., Yagovkina M.A., Brunkov P.N., Tsatsulnikov A.F. Study of GaN doping with carbon from propane in a wide range of MOVPE conditions // Journal of Crystal Growth. 2016. Vol. 449. P. 108–113. Doi: 10.1016/j.jcrysgro.2016.06.002.
7. Лундин В.В., Заварин Е.Е., Попов М.Г., Трошков С.И., Сахаров А.В., Смирнова И.П., Кулагина М.М., Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Цацульников А.Ф. Влияние содержания алюминия на морфологию поверхности сильнолегированных мезоструктур (Al)GaN, сформированных селективной газовой эпитаксией из металлоорганических соединений // ПЖТФ. 2015. Т. 41, № 20. С. 74–81.
8. Lundin W.V., Zavarin E.E., Sakharov A.V., Davydov V.Yu., Smirnov A.N., Zakheim D.A., Markov L.K., Brunkov P.N., Yagovkina M.A., Lundina E.Yu., Tsatsulnikov A.F. Growth of III-N graphene heterostructures in single OVPE MOVPE epitaxial process // Proc. of IC MOVPE XVIII, San Diego, California, July 10–15, 2016.

НТЦ Микроэлектроники РАН, г. Санкт-Петербург

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, г. Санкт-Петербург**

Контакты: Лундин Всеволод Владимирович,
lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

Материал поступил в редакцию: 12.01.2017

III-N MOVPE REACTORS: PRESENT AND FUTURE

W. V. Lundin, E. E. Zavarin, A. V. Sakharov, A. F. Tsatsulnikov, V. M. Ustinov

*Scientific and Technological Center for Microelectronics and Submicron Heterostructures of the RAS,
Saint-Petersburg, Russia
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg, Russia*

An analysis of the current situation on the market of III-N MOVPE equipment shows a lack of state-of-the-arts reactors of low-and moderate capacity. Our solution a compact horizontal flow reactor for one 100 mm wafer is presented in the paper. The reactor allows fast growth in the pressure range of 100–1600 mbar which results in a few times reduction of the duration of HEMT and LED epitaxial processes on sapphire and SiC substrates keeping high wafer uniformity. In addition to standard III-N materials and heterostructures deposition of Si_3N_4 and graphene layers, growth of GaN on graphene, doping with carbon from propane, and selective growth of highly-doped contact regions were demonstrated using the developed reactor.

Keywords: III-N, MOVPE, technological equipment, LED, HEMT

REFERENCES

1. Manasevit H.M. Single-crystal gallium arsenide on insulating substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, vol. 12, no. 4, pp. 156. Doi: 10.1063/1.1651934.
2. Lundin W.V., Davydov D.V., Zavarin E.E., Popov M.G., Sakharov A.V., Yakovlev E.V., Bazarevskij D.S., Talaev R.A., Tsatsulnikov A.F., Mizerov M.N., Ustinov V.M. MOVPE of III-N LED structures with short technological process. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 3, pp. 213–216. Doi: 10.1134/S1063785015030116.
3. Velikovskij L.E., Sim P.E., Polivanova Yu.N., Shishkin D.A., Lundin W.V., Zavarin E.E., Tsatsulnikov A.F. [Development of powerful GaN of L-S-C transistors of the range]. *Trudy 10-j Vserossijskoj konferencii "Nitridy galliya, indiya i alyuminiya — struktury i pribory"* [Proceedings of the 10th All-Russian conference "Gallium Nitrides, India and Aluminium — Structures and Devices"], Saint-Petersburg, 2015, 23–25 march, pp. 131. (In Russ.).
4. Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Zavarin E.E., et al. [Growth of HEMT of heterostructures of AlGaIn/GaN on substrates of SiC of domestic production]. *Trudy 10-j Vserossijskoj konferencii "Nitridy galliya, indiya i alyuminiya — struktury i pribory"* [Proceedings of the 10th All-Russian conference "Gallium Nitrides, India and Aluminium — Structures and Devices"], Saint-Petersburg, 2015, 23–25 march, pp. 129. (In Russ.).
5. Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Zavarin E.E., Yagovkina M.A., Sakharov A.V., Usov S.O., Zemlyakov V.E., Egorkin V.I., Bulashevich K.A., Karpov S.Yu., Ustinov V.M. Effect of the parameters of AlN/GaN/AlGaIn and AlN/GaN/InAlN heterostructures with a two-dimensional electron gas on their electrical properties and the characteristics of transistors on their basis. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 10, pp. 1383–1389. Doi: 10.1134/S1063782616100237.
6. Lundin W.V., Sakharov A.V., Zavarin E.E., Kazantsev D.Yu., Ber B.Ya., Yagovkina M.A., Brunkov P.N., Tsatsulnikov A.F. Study of GaN doping with carbon from propane in a wide range of MOVPE conditions. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 449, pp. 108–113. Doi: 10.1016/j.jcrysgro.2016.06.002.
7. Lundin W.V., Zavarin E.E., Popov M.G., Troshkov S.I., Saharov A.V., Smirnova I.P., Kulagina M.M., Davydov V.Yu., Smirnov A.N., Tsatsulnikov A.F. The influence of growth conditions on the surface morphology and development of mechanical stresses in Al(Ga)N layers during metalorganic vapor phase epitaxy. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 4, pp. 431–434. Doi: 10.1134/S1063785016040192.
8. Lundin W.V., Zavarin E.E., Sakharov A.V., Davydov V.Yu., Smirnov A.N., Zakheim D.A., Markov L.K., Brunkov P.N., Yagovkina M.A., Lundina E.Yu., Tsatsulnikov A.F. Growth of III-N graphene heterostructures in single OVPE MOVPE epitaxial process. *Proc. of IC MOVPE XVIII*, San Diego, California, July 10–15, 2016.

Contacts: Lundin Wsevolod Vladimirovich,
lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

Article received in edition: 12.01.2017