

06

Технология формирования субмикронного поверхностного рельефа для эпитаксиальных структур GaAs с тонкими стоп-слоями AlGaAs

© А.Г. Гладышев, М.М. Кулагина, С.А. Блохин, А.А. Красивичев,
Л.Я. Карачинский, А.П. Васильев, Н.А. Малеев, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский Академический университет —
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН
E-mail: glad@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2011 г.

Разработана базовая технология формирования субмикронного поверхностного рельефа в эпитаксиальных структурах GaAs, основанная на электронно-лучевой литографии. Высокая чувствительность характеристик вертикально-излучающего лазера к уровню оптических потерь позволяет использовать данную технологию для контроля модового состава и стабилизации поляризации излучения.

Разработка и исследование полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) является одним из практически важных и наиболее бурно развивающихся направлений современной полупроводниковой оптоэлектроники. ВИЛ обладают уникальными свойствами — низкой стоимостью, малыми размерами прибора и рабочими токами, симметричной диаграммой расходимости излучения и превосходными высокочастотными модуляционными характеристиками. В то же время для ряда применений, таких как миниатюрные атомные стандарты частоты, оптические устройства ввода-вывода (компьютерные „мышь“ и другие манипуляторы), а также в датчиках и сенсорах различного типа [1,2] требуется одномодовый поляризационно-стабильный режим работы лазера.

Однако реализация режима одномодовой генерации требует малых латеральных размеров активной (излучающей) области прибора [3], что ведет к резкому увеличению электрического и теплового сопротивления

и, как следствие, ограничивает предельный уровень выходной мощности. Кроме того, для типичной конструкции ВИЛ-диода характерна цилиндрическая симметрия и любая оптическая мода вырождена по поляризации (т.е. отсутствует выделенная поляризация излучения).

Конструкция и параметры оптического микрорезонатора наряду со свойствами активной области оказывают решающее влияние на приборные характеристики ВИЛ-диода. Условием начала лазерной генерации является баланс между оптическим усилением и суммарными оптическими потерями, включающими потери на вывод излучения из резонатора и внутренние потери в лазерной структуре. Высокая чувствительность характеристик ВИЛ-диода к уровню оптических потерь (как внутренних, так и внешних) позволяет осуществлять контроль модового состава и стабилизацию выделенной поляризации излучения [4,5].

Вариантом реализации контроля модового состава лазерного излучения может служить внесение (или удаление) в локальной области на поверхности структуры ВИЛ-диода дополнительного четвертьволнового слоя. Такой слой модифицирует спектр отражения и приводит к существенному изменению коэффициента пропускания верхнего распределенного брэгговского отражателя (РБО) на заданной резонансной длине волны и, как следствие, потерь на выход в зеркале. На рис. 1, *a* представлен результат численного моделирования зависимости коэффициента пропускания верхнего РБО от глубины травления. Травление слоев зеркала с определенной периодичностью приводит к существенному изменению потерь на выход. Таким образом, создавая на поверхности верхнего РБО поверхностный рельеф, можно селективно внести потери для определенных мод, как правило значительно увеличивая пороговое усиление для мод высокого порядка (рис. 1, *b*). Оптимизация геометрии поверхностного рельефа и размера токовой апертуры позволяет реализовывать режим одномодовой генерации ВИЛ-диода. Технически реализация данного подхода возможна с помощью стандартной фотолитографии и прецизионного травления (либо селективного травления до так называемого стоп-слоя).

При формировании поверхностного рельефа в виде решетки с шагом порядка длины волны генерации лазера в вакууме появляется возможность изменять коэффициент отражения зеркала для излучения с различным направлением поляризации, что позволяет стабилизировать выделенную поляризацию излучения. Стандартная фотолитография

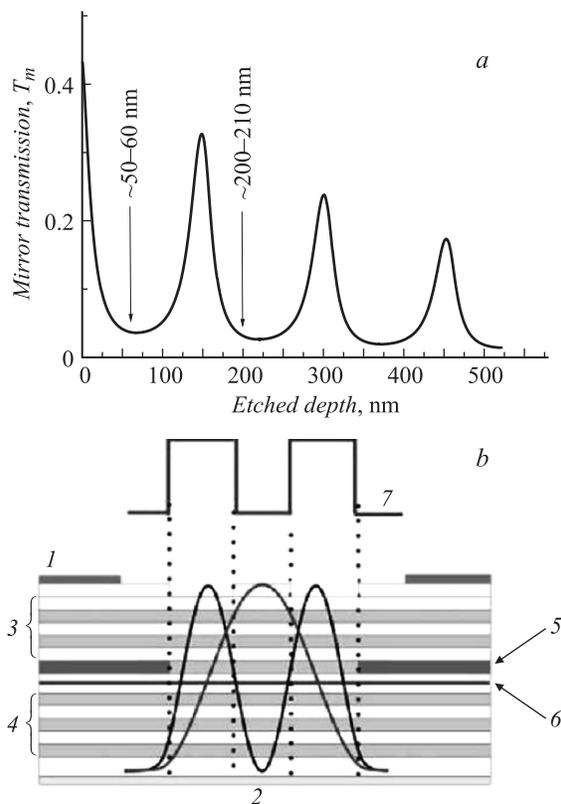


Рис. 1. Метод подавления мод высокого порядка, основанный на внесении селективных потерь в РБО: *a* — расчетный профиль изменения пропускания выходного РБО от глубины травления зеркала; *b* — схематическое изображение концепции введения оптических потерь; 1 — *p*-контакт, 2 — *n*-контакт, 3 — *p*-РБО, 4 — *n*-РБО, 5 — апертура $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$, 6 — активная область, 7 — профиль потерь на выход.

здесь уже непригодна и требуется применение электронной литографии. В данной статье обсуждаются проблемы разработки технологии создания поверхностного рельефа с помощью электронной литографии.

Для формирования требуемой топологии поверхностного рельефа в слое электронного резиста был использован сканирующий элек-

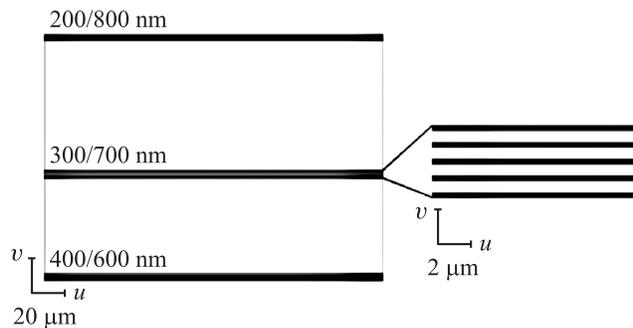


Рис. 2. Тестовый модуль, состоящий из трех вариантов субмикронных решеток. Справа увеличенное изображение решетки с шириной канавки 300 нм.

тронный микроскоп (СЭМ) Supra 25 фирмы Carl Zeiss с приставкой для электронной литографии Quantum фирмы Raith. Экспонирование проводилось при ускоряющем напряжении 10 кВ и апертуре диаметром $30 \mu\text{m}$. В качестве теста использовался рисунок с набором из трех вариантов решеток, состоящих из пяти канавок с различной шириной (для оценки ухода размеров), но одинаковым периодом $\sim 1 \mu\text{m}$ (рис. 2).

Каждый из трех вариантов решеток (с шириной канавки 200, 300 и 400 нм) был удален от соседних для исключения влияния эффекта близости при экспонировании. В качестве образцов использовались эпитаксиальные структуры GaAs со стоп-слоем AlGaAs, находящимся на глубине 60 нм от поверхности (далее образцы GaAs). Выбранное расстояние от поверхности до стоп-слоя в образцах GaAs соответствует расчетным значениям глубины травления поверхности верхнего зеркала (см. выше), обеспечивающей существенное изменение коэффициента пропускания зеркала. Тонкий стоп-слой AlGaAs может быть вставлен в контактный слой ВИЛ и не окажет сильного влияния на работу прибора и процесс его изготовления.

На первом этапе разработки в качестве позитивного электронного резиста был использован РММА марки 950 К 2А толщиной порядка 60 нм. После стандартной процедуры нанесения на образцы GaAs и последующей предварительной сушки резист подвергался экспонированию при дозе $70 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Доза экспонирования подбиралась заранее на образцах с такой же толщиной резиста. После экспонирования резист проявляли в метилизобутилкетоне (МИБК), разбавленном изопропило-

вым спиртом (IPS) в соотношении 1 : 3. Затем образец помещали в селективный травитель для удаления GaAs до стоп-слоя через маску электронного резиста.

На первом этапе работ было обнаружено, что резист имеет плохую адгезию к поверхности GaAs, что приводило к отслаиванию литографического рисунка во время травления GaAs. При этом время травления GaAs является достаточным для выхода на стоп-слой AlGaAs, что подтверждалось результатом исследования скола образца № 1, на котором было видно, что глубина травления составила величину порядка 60 nm.

Для улучшения адгезии была повышена температура сушки резиста после его нанесения. Была изготовлена серия образцов с различной температурой сушки резиста (100, 120 и 150°C) — образцы № 2_1, 2_2 и 2_3 соответственно. Исследование данной серии образцов показало, что повышение температуры сушки резиста слабо влияет на его адгезию, а процесс отслаивания резиста носит случайный, невоспроизводимый характер. Так, при температурах сушки 100 и 120°C резист остался на поверхности, а при температуре 150° — отслоился, хотя для образца № 1 сушка при 100°C приводила к отслаиванию резиста, а с ростом температуры сушки адгезия должна улучшаться. Тем не менее на образцах № 2_1 и № 2_2 были получены первые практические результаты и сформирована дифракционная решетка.

Обнаруженная проблема с адгезией резиста к поверхности GaAs требовала решения. Решению этого вопроса уделено много статей и исследований (см., например, [6,7]). Подходы к улучшению адгезии PMMA требуют либо использования сложного оборудования (предварительная обработка поверхности плазмой, бомбардировка ионами Ar⁺), либо использования подслоя с лучшими адгезионными свойствами. В рамках данной работы был выбран второй подход. В качестве подслоя было решено использовать фоторезист PMGI, хорошо зарекомендовавший себя в фотолитографии при работе с арсенидами. Использование подслоя привело к небольшому изменению процедуры обработки образца. После стандартной процедуры нанесения и подготовки двухслойной маски проводились экспонирование и проявление электронного резиста PMMA, после чего в открывшихся окнах проводилось проявление фоторезиста в растворе 1% KOH, а затем травление GaAs. Фоторезист PMGI не чувствителен к облучению потоком электронов, поэтому для него использовались уже отработанные времена проявления.

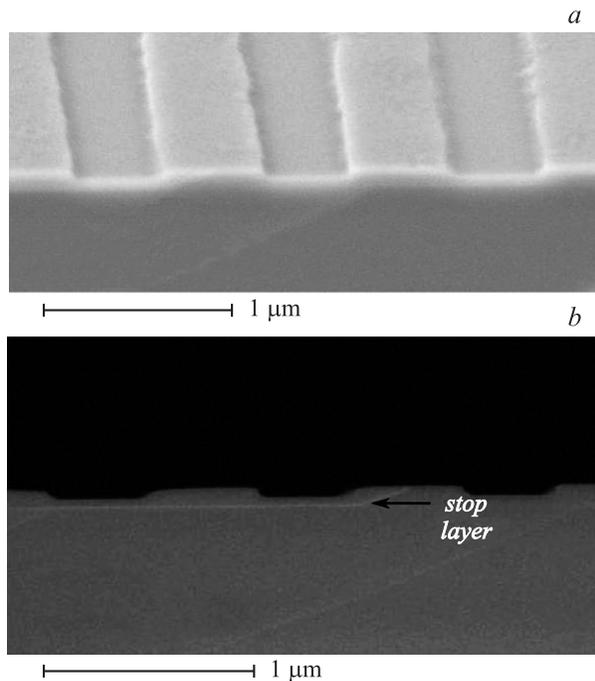


Рис. 3. Изображение СЭМ скола образца № 4_2 в области канавок 400/600 нм.

Для дальнейшей разработки технологии формирования дифракционной решетки был подготовлен образец № 3 с двухслойной маской. В связи с изменением свойств материала, на который наносился электронный резист, была повторно подобрана оптимальная доза экспонирования (в данном случае — $120 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). После проведения всей процедуры обработки снова возникла проблема с отслаиванием резиста, приводящая к травлению не только канавок решетки, но и областей между ними. При более тщательном изучении было обнаружено, что в этом случае проблема связана не с адгезией резиста, а с полным проявлением подслоя фоторезиста не только в области канавки, но и в области под электронным резистом, что и приводило к его отслаиванию.

В связи с этим было решено подобрать оптимальный состав проявителя для подслоя PMGI. Для этого были подготовлены три образца (№ 4_1, 4_2 и 4_3), проявление подслоя для которых проводилось

в растворе 1% КОН, который либо дополнительно не разбавлялся (№ 4_1 — повтор условий для образца № 3), либо разбавлялся водой в соотношении 1:2 (№ 4_2) или 1:3 (№ 4_3). Результаты исследований показали, что использование неразбавленного раствора проявителя приводит к проявлению всего подслоя, в то время как в разбавленном в соотношении 1:3 проявителе фоторезист не проявляется даже в области канавки. Оптимальным оказался проявитель, подготовленный для образца № 4_2 — подслоя PMGI полностью проявился в области канавки и при этом практически не проявился в боковые стороны, а ширина канавки с высокой точностью соответствовала проектной величине (рис. 3).

Таким образом, в рамках данной работы разработана базовая технология формирования поверхностного рельефа с характерным размером порядка длины волны, основанная на электронно-лучевой литографии. Следует отметить, что для дальнейшего развития технологии формирования поверхностного рельефа требуется отработка режимов селективного травления, а также дальнейшая оптимизация с учетом реальной топологии ВИЛ-диода и проверка на воспроизводимость. Представляется, что объединение концепции внесения селективных потерь и метода формирования рельефа с характерным размером порядка длины волны излучения позволит реализовать режим одномодовой генерации с фиксированной поляризацией излучения ВИЛ-диода.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

Список литературы

- [1] *Prujmbom A. et al. // Proceedings SPIE. 2008. V. 6908–16.*
- [2] *Serkland D.K., Peake G.M., Geib K.M., Lutwak R., Garvey R.M., Varghese M., Mescher M. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6132. P. 613208.*
- [3] *Jung C. et al. // Electron. Lett. 1993. V. 33. P. 1790.*
- [4] *Haglund A., Gustavsson J.S., Vukusic J., Modh P., Larsson A. // IEEE Photonics Technology Letters. 2004. V. 16. P. 368–370.*
- [5] *Debernardi P., Ostermann J.M., Feneberg M., Jalics C., Michalzik R. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2005. V. 11. P. 107–116.*
- [6] *Schmidt A., Clifton A., Ehrfeld W., Feiertag G., Lehr H., Schmidt M. // Microelectronic Engineering. January 1996. V. 30. P. 215–218.*
- [7] *Klemborg-Sapieha J.E., Martinu L., Yamasaki N.L.S., Lantman C.W. // Plasma Deposition and Treatment of Polymers MRS Proceedings. 1998. V. 544.*