07

Особенности формирования мезаструктуры методом электронно-лучевой литографии в полупроводниковых соединениях на основе GaAs

© А.Э. Ячменев [1], Д.В. Гарабов [1,2], Р.Р. Галиев [1], Д.В. Лаврухин [1,2], Д.С. Пономарев [1]

[1] Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия
[2] Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
E-mail: y.alex@runbox.com

Поступило в Редакцию 19 мая 2025 г.
В окончательной редакции 15 июля 2025 г.
Принято к публикации 5 августа 2025 г.

Приводятся экспериментальные результаты исследования жидкостного химического травления слоя GaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре, по маске, сформированной методом электронно-лучевой литографии. Разработаны основы технологии травления мезаструктуры, обеспечивающие качественный результат жидкостного химического травления элементов с точно заданными размерами в строго определенной области с минимальными отклонениями. Основы технологии включают в себя обязательную предобработку поверхности полупроводника перед нанесением резиста для улучшения адгезии и обработку в кислородной плазме после его проявления. С использованием разработанных основ технологии изготовлен экспериментальный образец оптоэлектронного источника терагерцевых импульсов со сложной топологией элементов мезаструктуры.

Ключевые слова: оптоэлектронный источник, терагерцевое излучение, жидкостное химическое травление, мезаструктура, полупроводники, электронно-лучевая литография.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.21.61527.20377

Активное освоение терагерцевого (THz) диапазона электромагнитного спектра началось с создания методики импульсной THz-спектроскопии (спектроскопия с регистрацией формы THz-импульсов) [1]. В данном методе для генерации и детектирования THz-импульсов можно использовать разные физические принципы (например, нелинейные явления), однако благодаря своей простоте и надежности наибольшее распространение получили фотопроводящие (оптоэлектронные) источники и детекторы, возбуждаемые фемтосекундными лазерными импульсами [2,3]. Между тем вследствие довольно низкой эффективности преобразования энергии импульса лазерного возбуждения в THz-излучение единичные оптоэлектронные устройства требуют специальных (и часто довольно затратных) конструкционных решений, включая плазмонные или встречно-штыревые электроды, диэлектрические метаповерхности и пр. [3]. В то же время эффективным способом увеличения мощности генерации THz-излучения является использование многоэлементных оптоэлектронных источников, состоящих из одномерной или двумерной матрицы единичных излучателей [4,5]. Ключевой проблемой при формировании топологии многоэлементного источника является необходимость в электрической изоляции соседних элементов [6], существенно снижающей паразитный (темновой) ток, а также исключающей формирование паттерна деструктивной интерференции THz-излучения от синфазно излучающих единичных источников в дальней зоне. Формирование такой изоляции подразумевает процесс травления элементов мезаструктуры на участках фотопроводящего слоя между отдельными элементами топологии.

В настоящей работе предложены оригинальные основы технологии создания мезаструктуры с точно воспроизводимыми размерами на основе сформированной методом электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) маски и жидкостного химического травления (ЖХТ) по этой маске слоя GaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре (low-temperature grown GaAs, LT-GaAs). Отметим, что ЭЛЛ является практически безальтернативным методом, если работа ведется с образцами малой площади или если требуется высокая прецизионность размеров элементов маски и их расположения.

Обычно для травления мезаструктуры используется метод плазмохимического травления хлорсодержащими газами [7]. При этом рисунок для травления формируется методом фотолитографии, использующим резист, устойчивый к воздействию плазмы. В случае использования сложной многоэлементной топологии расположение и размеры областей травления мезаструктуры необходимо задавать с высокой точностью, поэтому для формирования рисунка был использован метод ЭЛЛ. Применяемый в нем электронный резист обладает меньшей стойкостью в плазме по сравнению с фоторезистами, что приводит к необходимости использования ЖХТ из-за требуемой большой глубины травления мезаструктуры в диапазоне $1-2\,\mu$m. При этом жидкостное травление

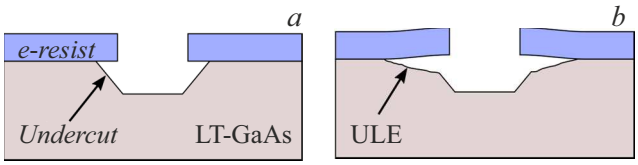

Рис. 1. Схематическое изображение особенностей профиля формирования мезаструктуры при ЖХТ в слое LT-GaAs при использовании маски, сформированной методом ЭЛЛ. *a* — растравливание в обе стороны (undercut); *b* — подтравливание под резист из-за отслоения резиста вследствие низкой адгезии (ULE — under layer etching).

по маске, сформированной методом ЭЛЛ, имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для качественного результата. В частности, при ЖХТ профиль областей травления может иметь характерный растрав в стороны вместе с травлением в глубину, обусловленный селективностью по отношению к кристаллографическим плоскостям (рис. 1, *a*), и подтравливанием под резист из-за его отслоения вследствие потери адгезии (рис. 1, *b*). Подтравливание под резист является негативным эффектом, приводящим к изменению размеров и качества границ элементов, поэтому для соответствия потравленного рисунка исходному этот эффект должен быть минимизирован или исключен полностью.

Для проведения исследований использовался LT-GaAs толщиной 1.5 μm, сформированный на подложке GaAs с кристаллографической ориентацией в плоскости (100). Перед экспонированием на установке ЭЛЛ Raith 150 TWO с ускоряющим напряжением 30 kV наносился однородный слой резиста ПММА 950К А4 толщиной $\sim 0.5\,\mu$m. Проявление проэкспонированных топологий проводилось в растворе МИБК:ИПС (1:3), а для последующего ЖХТ использовался раствор на основе H_3PO_4:H_2O_2:H_2O в соотношении 1:1:8, для которого характерны различные скорости травления в зависимости от кристаллографического направления [8]. Тестовая топология представляла собой набор узких полос длиной 100 μm и шириной 2, 5 и 10 μm, а также прямоугольников размером $50 \times 30\,\mu$m с набором градаций доз экспонирования $160-245\,\mu$C/cm^2 для каждого элемента.

Экспериментально было установлено, что отсутствие предобработки поверхности LT-GaAs перед нанесением резиста приводит к отслоению резиста при травлении, в результате чего возникает подтравливание под резист для всех элементов при любых дозах, что хорошо видно на рис. 2, *a*. Для улучшения адгезии перед нанесением резиста была введена предварительная обработка в растворе HCl:H_2O (1:5) в течение 1 min при температуре 21 °C для удаления поверхностных оксидов. Это привело к уменьшению глубины подтравливания до допустимой величины менее 100 nm, что составляет менее 10 % от толщины слоя LT-GaAs и является абсолютно допустимым при использовании данного материала в оптоэлектронных источниках THz-излучения. Латеральная величина подтравливания при этом составила менее 0.5 μm, что также является допустимым. Следующий обнаруженный эффект связан с тем, что в окнах резиста, проэкспонированных с максимальной дозой 245 μC/cm^2, травление не происходило. Это можно объяснить эффектом локальной негативизации резиста ПММА [9], который обычно связывают с площадными дозами более 1 mC/cm^2. Однако при малых размерах электронного луча (1–3 nm) доза распределяется на очень малой площади с большой плотностью и часть резиста не проявляется. Для решения этой проблемы после проявления резиста в течение 4 min производилась обработка в кислородной плазме на установке YES-G1000 (в конфигурации электродов „безэлектронная плазма“), использующей 40 kHz емкостный разряд с давлением кислорода 160 mTorr при мощности 100 W (соответствует скорости травления резиста около 80–90 Å/min), что приводило к удалению остатков негативизированного резиста. Следует отметить, что гипотеза о локальной негативизации подтверждается экспериментами, где рисунок маски травления экспонировался также дефокусированным электронным лучом: ЖХТ беспрепятственно происходило без вышеупомянутой постобработки в кислородной плазме. В результате была определена необходимость как предобработки поверхности (в растворе HCl:H_2O (1:5)) перед нанесением резиста, так и постобработки (в кислородной плазме) после его проявления, которые позволили получить рисунок тестовых элементов, равномерно протравленных для всех топологий по всем дозам экспонирования, что отчетливо видно на микрофотографии (рис. 2, *b*).

На рис. 2, *c* приведен фрагмент топологии пятиэлементного оптоэлектронного THz-источника на основе LT-GaAs, где отчетливо видны сформированные элементы мезаструктуры между его соседними электродами наряду с характерными размерами. Глубина травления мезаструктуры и ее ширина составляли ~ 1.5 и 3 μm соответственно, а размер элемента мезаструктуры между отдельными излучателями — $3 \times 6\,\mu$m. Также отметим, что описанный метод формирования мезаструктуры был успешно использован для сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs с разной мольной долей индия, выращенных на подложках GaAs.

Таким образом, в работе проведено исследование особенностей ЖХТ фотопроводящего слоя LT-GaAs по маске электронного резиста, связанные со спецификой ЭЛЛ. Изучены варианты травления по маске резиста ПММА, нанесенного без предобработки подложки перед его нанесением, и по маске, не прошедшей постобработку в кислородной плазме после проявления. Получены убедительные результаты, свидетельствующие о необходимости предобработки и постобработки, так как первая удаляет поверхностные оксиды, снижающие адгезию резиста, а последняя удаляет остатки резиста в проявленных областях, обеспечивая взаимодействие

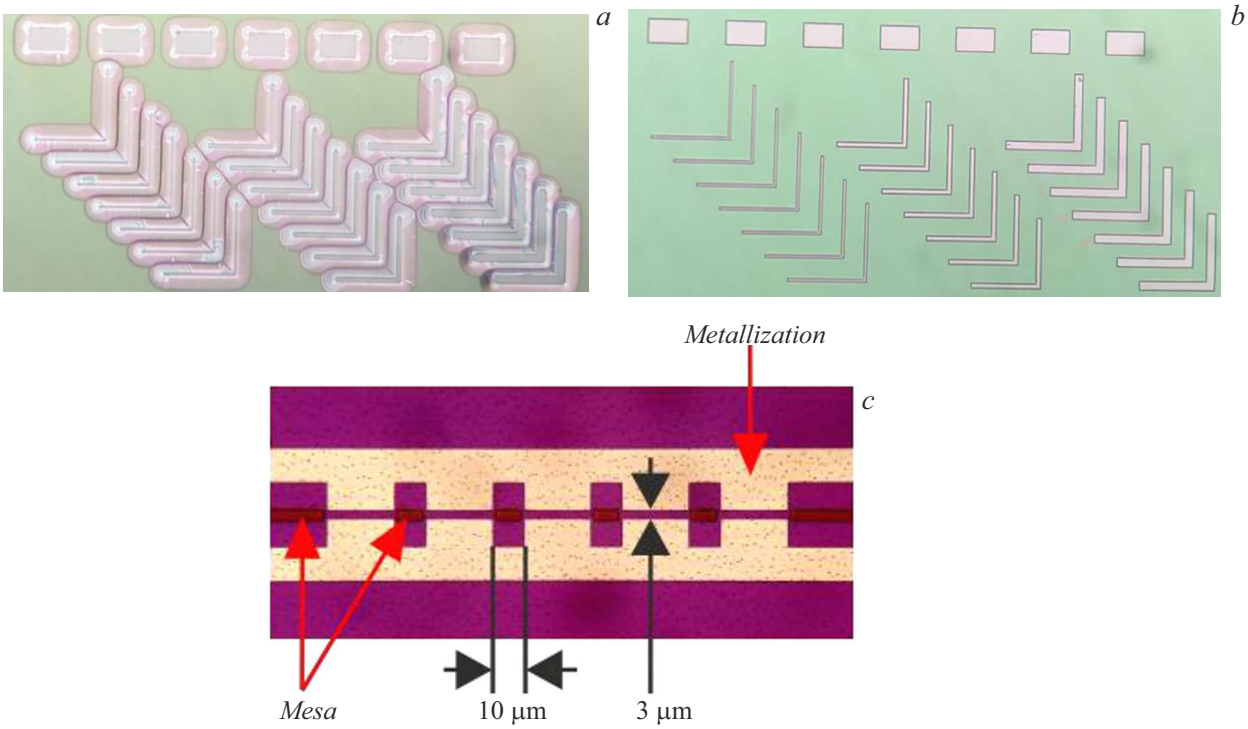

Рис. 2. Микрофотографии с оптического микроскопа с результатами травления элементов по маске резиста ПММА 950К А4. *a* — тестовые элементы без предобработки; *b* — тестовые элементы с предобработкой и постобработкой; *c* — увеличенное изображение фрагмента топологии пятиэлементного оптоэлектронного THz-источника со сложной мезаструктурой (mesa) с указанием размеров элементов.

травильного раствора с поверхностью LT-GaAs. Разработаны эффективные и воспроизводимые основы технологии ЖХТ, позволяющие с высокой степенью однородности формировать мезаструктуру сложной геометрии по маске электронного резиста, которая принципиально необходима в многоэлементных оптоэлектронных THz-источниках с вариативностью топологии отдельных излучающих элементов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-29-00420).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Koch, D. Mittleman, J. Ornik, E. Castro-Camus, Nat. Rev. Meth. Prim., **3**, 48 (2023). DOI: 10.1038/s43586-023-00232-z

[2] Д.С. Пономарев, А.Э. Ячменев, Д.В. Лаврухин, Р.А. Хабибуллин, Н.В. Черномырдин, И.Е. Спектор, В.Н. Курлов, В.В. Кведер, К.И. Зайцев, УФН, **194**, 2 (2024). DOI: 10.3367/UFNr.2023.07.039503 [D.S. Ponomarev, A.E. Yachmenev, D.V. Lavrukhin, R.A. Khabibullin, N.V. Chernomyrdin, I.E. Spektor, V.N. Kurlov, V.V. Kveder, K.I. Zaytsev, Phys. Usp., **67**, 3 (2024). DOI: 10.3367/UFNe.2023.07.039503].

[3] A.E. Yachmenev, D.V. Lavrukhin, I.A. Glinskiy, N.V. Zenchenko, Yu.G. Goncharov, I.E. Spektor, R.A. Khabibullin, T. Otsuji, D.S. Ponomarev, Opt. Eng., **59** (6), 061608 (2019). DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061608

[4] A. Singh, J. Li, A. Pashkin, R. Rana, S. Winnerl, M. Helm, H. Schneider, Opt. Express, **29** (13), 19920 (2021). DOI: 10.1364/OE.427247

[5] R. Henri, K. Nallappan, D.S. Ponomarev, H. Guerboukha, D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, R.A. Khabibullin, M. Skorobogatiy, IEEE Access, **9**, 117691 (2021). DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3106227

[6] N.T. Yardimci, S.-H. Yang, C.W. Berry, M. Jarrahi, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **5**, 223 (2015). DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2395417

[7] G.S. Oehrlein, D. Metzler, C. Li, ECS J. Solid State Sci. Technol., **4** (6), N5041 (2015). DOI: 10.1149/2.0061506jss

[8] V. Cambel, D. Gregušová, R. Kúdela, J. Appl. Phys., **94** (7), 4643 (2003). DOI: 10.1063/1.1602570

[9] A.C.F. Hoole, M.E. Welland, A.N. Broers, Semicond. Sci. Technol., **12** (9), 1166 (1997). DOI: 10.1088/0268-1242/12/9/017