

08

Формирование диэлектрических резонаторов на основе светоизлучающих Ge/Si-гетероструктур

© Д.В. Юрасов,¹ М.В. Шалеев,¹ Д.В. Шенгуров,¹ А.В. Перетокин,¹ Е.В. Скороходов,¹ Е.Е. Родякина,^{2,3} Ж.В. Смагина,² А.В. Новиков¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: Inquisitor@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2024 г.

В окончательной редакции 28 октября 2024 г.

Принято к публикации 14 ноября 2024 г.

Представлены результаты по отработке технологии глубокого анизотропного плазмохимического травления полупроводниковых GeSi структур с использованием инверсной электронной литографии с комбинированным нанесением металлической маски и электронного резиста. Осуществлена оптимизация различных этапов технологического процесса для формирования металлической маски и последующего переноса рисунка на реальную структуру в образце с учетом эффекта близости при литографии и изменения реальных размеров отверстий в процессе плазмохимического травления. Проведено сравнение результатов, полученных данным методом, с таковыми при использовании в качестве маски специализированного плазмостойкого электронного резиста. Продемонстрированы возможности данного подхода для формирования двумерных фотонных кристаллов на полупроводниковой GeSi гетероструктуре с толщиной $1\ \mu\text{m}$ и более. Показано, что сформированные фотонные кристаллы позволяют увеличить интенсивность сигнала фотолюминесценции более чем на порядок величины по сравнению с исходной структурой.

Ключевые слова: SiGe гетероструктуры, электронная литография, металлическая маска, плазмохимическое травление, фотонные кристаллы, фотолюминесценция.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59470.229-24

Введение

В настоящее время одним из эффективных подходов модификации оптических свойств материалов является использование различных диэлектрических резонаторов [1–4]. Данный подход позволил управлять распространением излучения на субволновом масштабе [5] и создать как мощные [6], так и миниатюрные источники лазерного излучения [7]. Применение диэлектрических резонаторов к структурам на основе кремния в сочетании с использованием возможностей современной интегральной технологии привело к разработке новых оптических элементов [4,8]. Это, в первую очередь, относится к пассивным оптическим элементам, однако диэлектрические резонаторы используют и для решения проблемы создания источника излучения для кремниевой оптоэлектроники. Здесь идут работы как в направлении формирования резонаторов на прямозонных структурах A3B5 и их интеграции с кремнием [9,10], так и формирования резонаторов на светоизлучающих структурах на основе кремния [11,12] и его гетероструктур с Ge [13–18]. Последнее направление является более перспективным с точки зрения совместимости создаваемых

источников излучения с современной интегральной КМОП-технологией.

Используемые диэлектрические микрорезонаторы (здесь подразумеваются либо резонаторы субволновых размеров, либо с субволновыми размерами элементов, требующих, как правило, использования электронной, а не оптической литографии) на основе кремния можно условно разбить на два больших класса, которые существенным образом отличаются по технологии формирования. К первому классу относятся различные Ми-резонаторы, которые чаще всего представляют собой одиночные столбики субмикронного размера [16] или их массивы [19]. Для формирования таких резонаторов из планарных структур методом плазмохимического травления (ПХТ) используется или маска из негативного электронного резиста, или металлическая маска, полученная с помощью позитивного электронного резиста и взрывной литографии. При этом одним из основных факторов, ограничивающих высоту формируемых резонаторов, является селективность травления маски по отношению к травлению самой структуры. В настоящее время хорошие возможности для создания Ми-резонаторов дают негативные резисты на основе силсесквиоксана водорода (Hydrogen silsesquioxane,

HSQ). Продемонстрировано [20], что данный негативный резист обеспечивает селективность (скорость травления кремния: скорость травления резиста) 19:1 при травлении кремния в смеси газов $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$. Однако существенным недостатком данного резиста является его малый срок хранения (от 3 до 9 месяцев в зависимости от растворителя и условий хранения [21]). Альтернативным подходом при формировании Ми-резонаторов является использование позитивного электронного резиста и маски из металлической пленки, например, пленки Cr, формируемой с помощью взрывной литографии [22]. В этом случае низкие скорости травления Cr во фторидной плазме обеспечивают очень высокую селективность травления по отношению к кремниевым структурам [23].

Ко второму классу диэлектрических микрорезонаторов можно отнести различные двумерные фотонные кристаллы (ФК), представляющие собой чаще всего упорядоченные массивы отверстий субмикронного диаметра, формируемые методами плазмохимического травления [24]. Простым способом формирования ФК является применение маски из наиболее широко используемого позитивного резиста на основе полиметилметакрилата (ПММА). Однако невысокая ($\sim 2 : 1$) селективность травления ПММА по отношению к кремнию для распространенных условий проведения плазмохимического травления [25] накладывает серьезные ограничения на глубину травления ФК. Было продемонстрировано, что эти ограничения несущественны при формировании ФК на структурах „кремний на изоляторе“ (КНИ, SOI) [12] и структурах с Ge(Si) самоформирующимися наноостровками, если суммарная толщина структуры над скрытым окислом не превышает 350–400 nm [26].

Однако в последнее время повышенное внимание привлекают светоизлучающие структуры на основе слоев Ge, сформированных на кремнии [27–29]. Хотя германий, как и кремний, является непрямозонным полупроводником, разница между прямой и непрямой запрещенными зонами в нем составляет всего 136 meV [27]. Поэтому вероятность оптических переходов в Ge значительно выше, чем в Si, и она увеличивается при приложении к нему растягивающих напряжений и/или легирования донорными примесями [27–29], либо внедрения олова [30–32]. Несмотря на прогресс при использовании указанных подходов, лазерная генерация в Ge/Si структурах достигалась в основном при криогенных температурах [31,33]. О достижении лазерной генерации при 300 K также сообщалось, но только при огромных величинах пороговых мощностей накачки ($\sim \text{MW}/\text{cm}^2$) [28], что делает такие лазеры непригодными для практических применений. Поэтому в настоящее время продолжают работы по повышению эффективности источников излучения на основе данных структур, в том числе за счет использования диэлектрических резонаторов.

Существенным отличием Ge/Si структур от светоизлучающих КНИ структур и структур с Ge(Si) наноостровками является их большая толщина, которая составляет

$\geq 1 \mu\text{m}$. Это обусловлено необходимостью использования буферного слоя для эффективного снижения плотности прорастающих дефектов в Ge слое, выращенном на Si [34–36]. С одной стороны, это позволяет получить Ge/Si слои с достаточно низкой шероховатостью поверхности (типичное значение среднеквадратичной шероховатости $\leq 1 \text{nm}$) и с относительно невысокой плотностью прорастающих дислокаций ($\leq 10^7 \text{cm}^{-2}$) [34–37], но, с другой стороны, большая толщина Ge/Si структур приводит к последующей сложности формирования микрорезонаторов с субмикронными характерными размерами элементов на таких структурах. Благодаря более высокой скорости травления Ge по сравнению с Si во фторидной плазме, при использовании маски из ПММА резиста удается достигнуть селективности $\sim 3 : 1$, что при стандартных толщинах резиста 150–200 nm позволяет формировать ФК с глубиной травления отверстий 500–600 nm [38], т.е. только на $\sim 1/2$ толщины Ge слоя. Это накладывает ограничения на возможности управления излучательными свойствами Ge/Si структур. В настоящей работе рассмотрены различные подходы (плазмостойкий позитивный резист и металлическая маска) к формированию фотонных кристаллов на Ge/Si структурах с большой ($\geq 1 \mu\text{m}$) глубиной травления.

1. Результаты исследований и их обсуждение

Для отработки технологии формирования ФК с глубоким травлением использовались как тестовые структуры, сформированные на Ge(001) подложках, так и Ge-релаксированные слои, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на КНИ структурах. При формировании Ge/SOI структуры после очистки поверхности и роста Si буферного слоя толщиной $\sim 100 \text{nm}$ осаждался слой Ge по двухтемпературной схеме [34,39,40]. Суммарная толщина слоя Ge составляла порядка $1.1 \mu\text{m}$. Формирование структуры заканчивалось циклическим отжигом аналогично [40]. Исходные Ge/SOI структуры демонстрировали сигнал люминесценции при комнатной температуре в районе $1.55 \mu\text{m}$ [38], связанный с прямыми излучательными переходами в слое Ge.

Плазмохимическое травление структур было выполнено методом реактивного ионного травления с источником индуктивно связанной плазмы (ICP RIE) на установке AXIC. В настоящей работе рассмотрены два подхода к формированию на Ge/SOI структурах ФК с глубиной травления $\geq 1 \mu\text{m}$. В первом подходе для этого использовался позитивный плазмостойкий электронный резист AR-P 6200 (CSAR 62) (AllResist, GmbH), во втором — маска из пленки Cr, полученная с помощью позитивного электронного резиста на основе ПММА и взрывной литографии. Травление образцов с маской из резиста проходило в смеси газов SF_6/CHF_3 (соотношение потоков 3:20, мощность ICP источника составляла 700 W, а

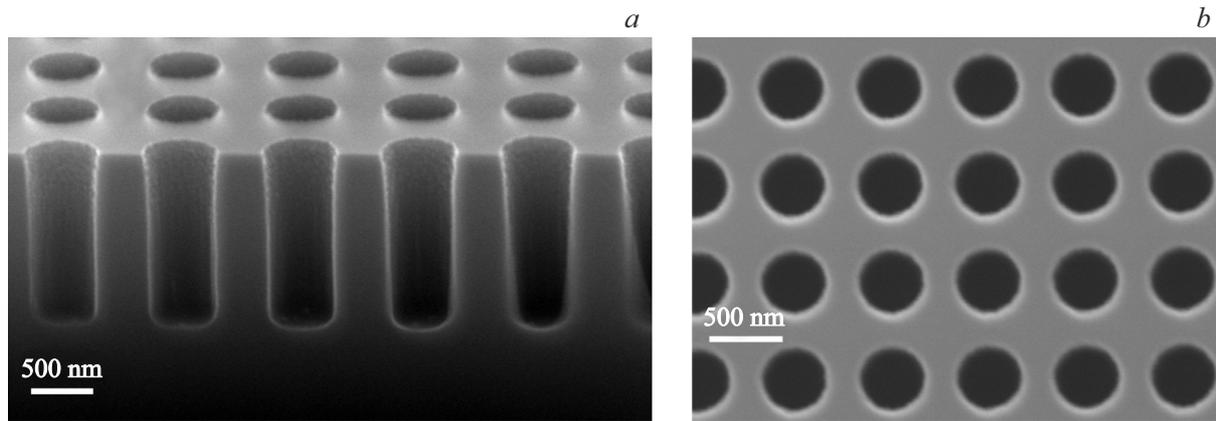


Рис. 1. СЭМ снимки одного из ФК, сформированных на Ge(001) пластине с помощью маски из плазмостойкого резиста AR-P 6200: *a* — вид сбоку на скол ФК, *b* — вид на ФК сверху.

мощность RF источника — 30 W) при давлении 20 mTorr. Травление образцов с металлической маской проходило в смеси газов SF_6/C_4F_8 (соотношение потоков 5:8, мощность ICP 700 W, мощность RF 60 W) при давлении 17 mTorr. Указанные условия травления были выбраны с точки зрения или увеличения скорости травления Ge при сохранении высокой анизотропии травления (в случае использования маски из резиста), или минимизации бокового травления (при использовании металлической маски). Общее время травления структур не превышало 2–2.5 min. Процесс травления разбивался на этапы продолжительностью не более 20 s во избежание перегрева структуры и маски. Для определения параметров полученных ФК использовалась сканирующая электронная микроскопия.

Оптические свойства сформированных ФК исследовались с помощью спектроскопии микро-ФЛ при 300 K. Для возбуждения ФЛ использовался Nd:YAG-лазер (длина волны 532 nm), излучение которого фокусировалось на образец с помощью объектива 10x, и собиралось тем же объективом. Сигнал микро-ФЛ регистрировался при комнатной температуре с помощью фурье-спектрометра Bruker IFS 125 HR и охлаждаемого Гедетектора.

При работе с маской из плазмостойкого резиста AR-P 6200 проведенные эксперименты показали, что, как и заявлено в технических характеристиках [41], при одинаковых условиях его скорость плазмохимического травления в ~ 2 раза меньше, чем ПММА резиста. При формировании ФК с использованием маски из резиста травлению подвергаются только области отверстий ФК, в которых удален резист. Поэтому для определения глубины и профиля травления отверстий ФК, полученных с помощью резиста AR-P 6200, на Ge структурах формировались тестовые ФК в форме прямоугольника, длинная (длиной 200–300 μm) сторона которых была ориентирована перпендикулярно кристаллографическому направлению структуры типа [110], которое является направлением легкого скола для Ge и

Si пластин с ориентации (001). После травления поперек длинной стороны ФК был сделан скол, качество которого позволяло анализировать параметры ФК (рис. 1, *a*). Согласно анализу СЭМ снимков, глубина травления отверстий ФК уменьшается с уменьшением их диаметра и для исследованных ФК достигает $\sim 1.1 \mu m$ для отверстий диаметром $\sim 300 nm$ и $\sim 1.5 \mu m$ для отверстий диаметром $\sim 550 nm$ (рис. 1). Согласно этим данным, при плазмохимическом травлении Ge структур с помощью маски из резиста AR-P 6200 была достигнута селективность травления структуры относительно маски в диапазоне (6–8):1. СЭМ снимки ФК демонстрируют высокую анизотропию травления (рис. 1, *a*) и форму отверстий, близкую к круглой (рис. 1, *b*). Таким образом, использование маски из плазмостойкого позитивного электронного резиста AR-P 6200 позволяет получать на Ge структурах ФК с отверстиями субмикронного диаметра и глубиной травления $> 1 \mu m$.

Однако существенным недостатком использования резиста AR-P 6200 является его дороговизна и малый (6 месяцев [41]) срок хранения. Поэтому в настоящей работе для формирования ФК с большой глубиной травления была также использована маска из хрома, полученная с помощью маски из ПММА резиста. Хром был выбран в качестве материала металлической маски, так как он имеет низкую скорость травления во фторсодержащей плазме [23], легко наносится и селективно удаляется с поверхности Si и Ge. Процесс формирования ФК с помощью металлической маски схематически изображен на рис. 2, *a*.

В настоящей работе использовалась металлическая маска из Cr толщиной 30 nm. Формирование ее проводилось методом „взрывной“ литографии — нанесение металла через маску в резисте путем магнетронного распыления с последующим удалением неэкспонированного резиста и металла на нем в диметилформамиде (90°, 60 min) (рис. 2, *a*). Для улучшения морфологии краев металлической маски при ее формировании использовалась маска из двухслойного резиста

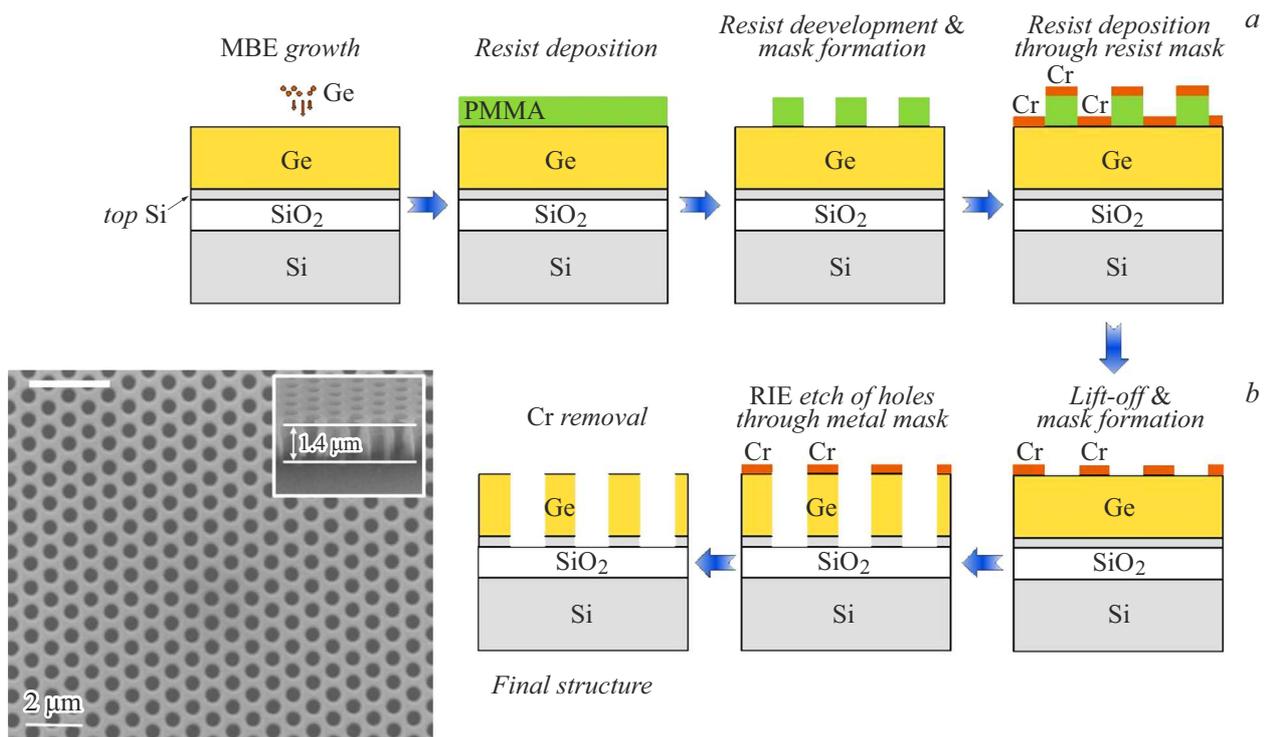


Рис. 2. *a* — схема процесса формирования структуры с ФК. Верхний слой Si в КНИ подложке вместе с Si буферным слоем обозначен серым прямоугольником (top Si); *b* — СЭМ снимок одного из изготовленных ФК с использованием металлической маски (вид сверху). На вставке показан вид сбоку скола одного из ФК, сделанный для определения общей глубины протравленных отверстий.

PMMA950K/PMMA350K, в результате экспонирования которой формируется искусственный обратный наклон профиля отверстий в резисте для обеспечения разрыва между металлом, осажденным в отверстия на подложку, и металлом, осажденным на неэкспонированный резист.

В отличие от формирования ФК с помощью позитивного плазмостойкого резиста, когда экспонируются непосредственно области для травления отверстий ФК, при создании металлической маски с помощью позитивного резиста необходимо формирование в нем инвертированного изображения — негатива, в котором экспонируется не область отверстий, а область между отверстиями. Было установлено, что, в результате эффекта близости при электронной литографии, чем меньше значение отношения радиуса отверстия ФК (r) к его периоду (a), тем больше отклонение размера отверстий в металлической маске от значений, заданных в шаблоне при проведении литографии. Соответственно, размер полученных отверстий в металлической маске оказывается заметно меньше заданных в шаблоне. На рис. 3, *a* представлена зависимость изменения размера отверстий (пересчитанная в фактор заполнения, определяемый как отношение радиуса отверстий к периоду их следования, r/a) в металлической маске от периода ФК для трех различных номинально заданных в шаблоне соотношениях r/a (0.25, 0.3 и 0.35). Видно, что зависимость $r/a(a)$ линейна, но ее наклон увеличи-

вается с ростом соотношения r/a . Таким образом, получаемые экспериментально подобные зависимости при заданном соотношении r/a позволяют прогнозировать размер отверстий для других периодов, но не других соотношений r/a . По полученным данным может быть произведен перерасчет размеров отверстий в шаблоне для получения требуемых соотношений r/a .

Кроме изменения размера отверстия в шаблоне, варьируемым параметром для корректировки размеров в полученной маске являлся поправочный коэффициент fd к дозе экспонирования (базовая доза экспонирования на единицу площади $310 \mu\text{A}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, ускоряющее напряжение 20 kV). На рис. 3, *b* представлены зависимости размера отверстий в металлической маске для разных значений коэффициентов fd (при фиксированном значении $r/a = 0.35$ в шаблоне), из которых видно, что зависимости имеют одинаковый наклон. Таким образом, уменьшение дозы экспонирования позволяет увеличить размер отверстий (и соответственно r/a) в маске без изменения шаблона. Однако излишнее снижение коэффициента fd до 0.7 приводит к недостаточной для полной проявки резиста дозе экспонирования.

На рис. 3, *c* представлены зависимости диаметра отверстий ФК в Ge/SOI структуре после плазмохимического травления в зависимости от коэффициента fd для двух периодов ($a = 600$ и 900 nm), которые демонстрируют возможность изменения параметров отверстий

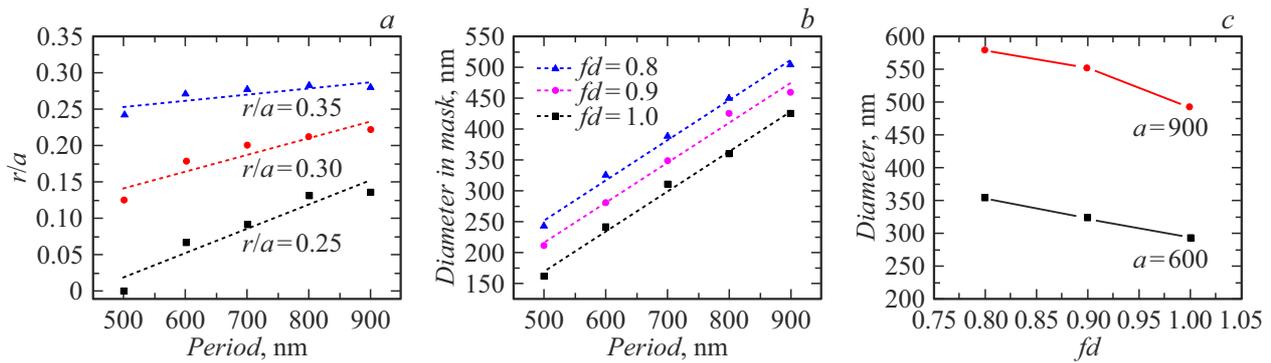


Рис. 3. *a* — зависимости полученных в металлической маске диаметров отверстий (пересчитанных в соотношения r/a) от периода ФК для трех номинально заданных в шаблоне значений r/a , которые указаны рядом с соответствующими зависимостями. Зависимости получены для коррекционного фактора дозы $fd = 0.8$; *b* — зависимости полученных в металлической маске диаметров отверстий от периода ФК при варьировании поправочного коэффициента дозы fd . Значения fd приведены рядом с соответствующими зависимостями; *c* — зависимость диаметра отверстий ФК в протравленной Ge/SOI структуре в зависимости от коэффициента fd для двух периодов, значения которых указаны рядом с соответствующими зависимостями. Значения получены для $r/a = 0.35$ в шаблоне.

ФК за счет изменения корректирующего коэффициента дозы. Номинально заданное в шаблоне соотношение r/a составляло 0.35. Видно, что реальные значения диаметров оказались меньше требуемых для всех fd , но наименьшее отклонение получилось при минимальном из взятых $fd = 0.8$. Ввиду этого при использовании металлической маски необходимо учитывать отклонение реально получаемого диаметра отверстий в структуре после проведения плазмохимического травления. Таким образом, при формировании ФК в виде протравленных отверстий с помощью металлической маски, для получения отверстий с заданными параметрами можно использовать оба вышеперечисленных метода корректировки — и поправочный коэффициент дозы fd , и подстройку параметров в шаблоне для литографии.

В результате с учетом вышеперечисленных методов корректировки были получены массивы отверстий с требуемыми параметрами, полностью протравленных через выращенные слои Ge (и Si) вплоть до слоя SiO_2 , которые и формировали ФК. Как указывалось выше, из-за низкой скорости травления маски из Si может достигать высоких значений [23]. Это позволяет получать на Ge/SOI структурах ФК с глубиной травления больше $1 \mu\text{m}$. В работе были изготовлены ФК с периодами $a = 600\text{--}900 \text{ nm}$ и фактором заполнения $r/a \sim 0.3$. Пример одного из сформированных ФК показан на рис. 2, *b*. Необходимо отметить, что при использовании металлической маски ПХТ подвергается вся структура, кроме области ФК. Поэтому параметры отверстий ФК могут быть проанализированы, исходя из СЭМ снимков границы ФК (вставка на рис. 2, *b*). Анализ СЭМ снимков отверстий ФК, полученных различными методами, показывает, что вертикальность стенок отверстий, полученных при использовании маски из плазмостойкого резиста (рис. 1, *a*)

лучше, чем в случае использования металлической маски (рис. 2, *b*). При использовании последней происходит некоторый боковой подтрав верхней части слоя Ge (т.е. образуется положительный наклон стенок), что, возможно, связано с накоплением заряда на поверхности металла в отсутствие возможности его стока, однако данное предположение требует дальнейшей проверки. Другой возможной причиной является тот факт, что при нанесении металла взрывной литографией почти вся площадь образца остается открытой, а маской закрыта лишь непосредственно активная область (в нашем случае — область ФК). В результате при процессе ПХТ области вокруг ФК вытравливаются, что может приводить к появлению бокового подтрав краев активной области.

Для ФК, полученных на Ge/SOI структуре с помощью металлической маски, были проведены исследования их спектров фотолуминесценции при комнатной температуре. Результаты измерения спектров микро-ФЛ при 300 K показаны на рис. 4 для нескольких ФК с различными периодами и двумя значениями фактора заполнения r/a . Также для сравнения на рис. 4 показан спектр от исходной Ge/SOI структуры без ФК. Видно, что в обоих случаях наблюдается значительное возрастание как пиковой, так и интегральной интенсивности сигнала ФЛ от ФК по сравнению с исходной структурой. Наибольшее увеличение пиковой интенсивности наблюдается при наилучшем спектральном соответствии моды ФК максимуму сигнала ФЛ от исходной структуры (вблизи 800 meV , что соответствует энергии прямого оптического перехода в Ge). Небольшое расхождение связывается с эффектами интерференции, поскольку структуры выращены на подложках SOI (см. предыдущую работу авторов [38], где наблюдался аналогичный эффект). Для ФК с меньшим r/a более явно прослеживается модовая структура ФК, что выражается в более четко выделенных нескольких пиках на спектрах ФЛ,

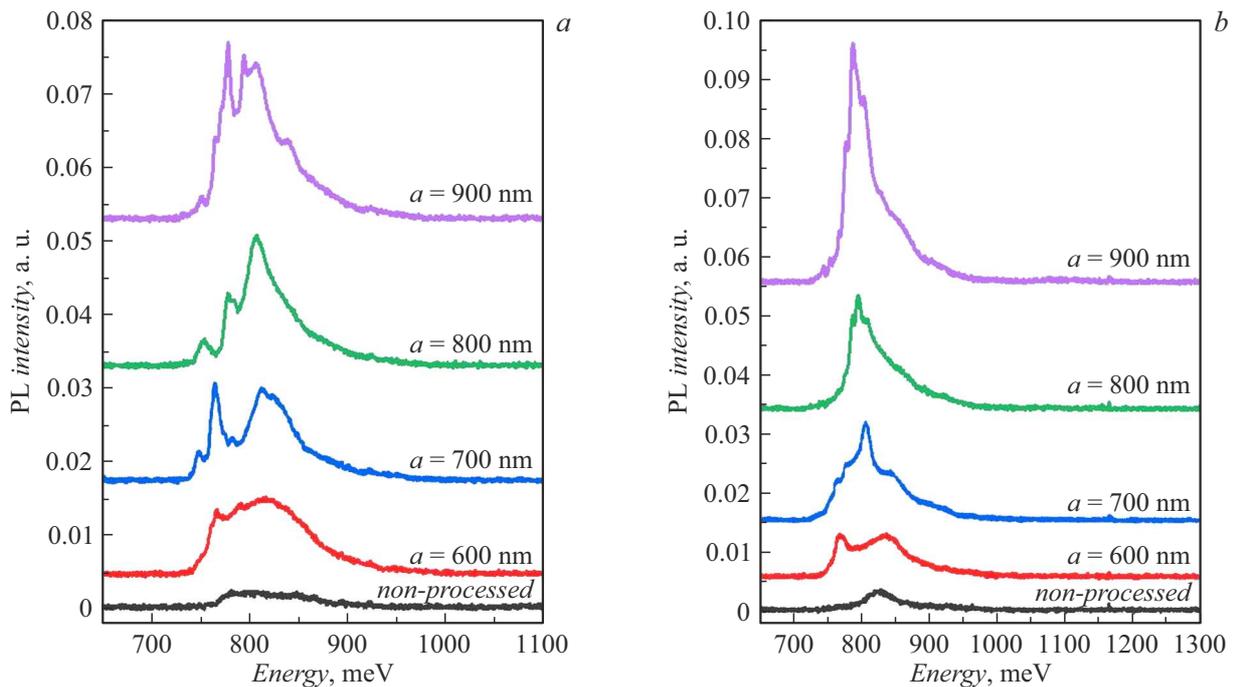


Рис. 4. Спектры микро-ФЛ для набора ФК с различными периодами, указанными рядом с соответствующими спектрами, и исходной области (non-processed) при значениях фактора заполнения $r/a = 0.29$ (a) и 0.33 (b). Все измерения выполнены при 300 К.

однако и для больших r/a наличие нескольких пиков в спектрах различно. Количественный анализ показал, что в лучших образцах с ФК наблюдалось увеличение пиковой интенсивности ФЛ до 20 раз, а интегральной — до 17 раз по сравнению с исходной структурой без ФК. Данный факт связывается как с улучшением выхода излучения из структуры из-за нарушения условий полного внутреннего отражения, так и, возможно, с проявлениями эффекта Парселла, однако определение вклада каждого из этих факторов лежит за рамками настоящей работы.

Заключение

Таким образом, в работе была исследована возможность использования инверсной литографии для формирования металлической маски на образцах на основе Ge слоев, выращенных на SOI подложках. Была отработана технология формирования металлической маски в сочетании с плазмохимическим травлением, которая позволяет формировать глубокие (более $1\ \mu\text{m}$) отверстия в Ge/Si материале. Сравнение предложенного метода с использованием для ПХТ специализированного плазмостойкого электронного резиста показало достижимость сопоставимых глубин травления, хотя и при несколько худшей вертикальности стенок отверстий. Тем не менее потенциально использование металлической маски при необходимости получения больших глубин травления с малыми размерами элементов рисунка может быть пер-

спективнее, ввиду того, что плазмостойкий резист все же имеет ограниченную селективность, хотя и превышающую таковую для стандартных электронных резистов. Возможности данного метода были подтверждены путем формирования фотонных кристаллов на слоях Ge/SOI и демонстрации увеличения сигнала ФЛ от таких структур более чем на порядок величины.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФМ РАН (FFUF-2024-0019). Часть работы, связанная с проведением электронно-лучевой литографии, была поддержана в рамках государственного задания ИФП СО РАН.

Благодарности

Авторы благодарят ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН, ЦКП „Наноструктуры“ ИФП СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ за предоставление возможностей использования технологического оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.I. Kuznetsov, A.E. Miroschnichenko, M.L. Brongersma, Y.S. Kivshar, B. Lukyanchuk. *Science*, 354, aag2472 (2016). DOI: 10.1126/science.aag2472
- [2] K. Koshelev, Y. Kivshar. *ACS Photon*, **8**, 102 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.0c01315
- [3] O.A.M. Abdelraouf, Z. Wang, H. Liu, Z. Dong, Q. Wang, M. Ye, X.R. Wang, Q.J. Wang, H. Liu. *ACS Nano*, **16**, 13339 (2022). DOI: 10.1021/acsnano.2c04628
- [4] A.I. Kuznetsov, M.L. Brongersma, J. Yao, M.K. Chen, U. Levy, D.P. Tsai, N.I. Zheludev, A. Faraon, A. Arbabi, N. Yu, D. Chanda, K.B. Crozier, A.V. Kildishev, H. Wang, J.K.W. Yang, J.G. Valentine, P. Genevet, J.A. Fan, O.D. Miller, A. Majumdar, J.E. Fröch, D. Brady, F. Heide, A. Veeraraghavan, N. Engheta, A. Alù, A. Polman, H.A. Atwater, P. Thureja, R. Paniagua-Domínguez, S.T. Ha, A.I. Barreda, J.A. Schuller, I. Staude, G. Grinblat, Yu. Kivshar, S. Peana, S.F. Yelin, A. Senichev, V.M. Shalaeu, S. Saha, A. Boltasseva, Ju. Rho, D.K. Oh, J. Kim, J. Park, R. Devlin, R.A. Pala. Roadmap for Optical Metasurfaces, *ACS Photonics*, **11**, 816 (2024). DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c00457
- [5] P. Moitra, X. Xu, R. Maruthiyodan Veetil, X. Liang, T.W.W. Mass, A.I. Kuznetsov, R. Paniagua-Domínguez. *ACS Nano*, **17**, 16952 (2023). DOI: 10.1021/acsnano.3c04071
- [6] M. Yoshida, S. Katsuno, T. Inoue, J. Gellera, K. Izumi, M. De Zoysa, K. Ishizaki, S. Noda. *Nature*, **618**, 727 (2023). DOI: 10.1038/s41586-023-06059-8
- [7] V. Mylnikov, S.T. Ha, Zh. Pan, V. Valuckas, R. Paniagua-Domínguez, H.V. Demir, A.I. Kuznetsov. *ACS Nano*, **14**, 7338 (2020). DOI: 10.1021/acsnano.0c02730
- [8] W. Song, X. Liang, Sh. Li, D. Li, R. Paniagua-Domínguez, K.H. Lai, Q. Lin, Y. Zheng, A.I. Kuznetsov. *Laser Photonics Rev.*, **15**, 2000538 (2021). DOI: 10.1002/lpor.202000538
- [9] K. Takeda, T. Tsurugaya, T. Fujii, A. Shinya, Y. Maeda, T. Tsuchizawa, H. Nishi, M. Notomi, T. Kakitsuka, S.H. Matsuo. *Opt. Expr.*, **29**, 26082 (2021). DOI: 10.1364/OE.427843
- [10] E. Dimopoulos, A. Sakanas, A. Marchevsky, M. Xiong, Y. Yu, E. Semenova, J. Mørk, K. Yvind. *Laser Photonics Rev.*, **16**, 2200109 (2022). DOI: 10.1002/lpor.202200109
- [11] A. Shakoor, R.L. Savio, P. Cardile, S.L. Portalupi, D. Gerace, K. Welna, S. Boninelli, G. Franzò, F. Priolo, Th.F. Krauss, M. Galli, L. O'Faolain. *Laser Photonics Rev.*, **7**, 114 (2013). DOI: 10.1002/lpor.201200043
- [12] A. Mahdavi, G. Sarau, J. Xavier, T.K. Paraíso, S. Christiansen, F. Vollmer. *Sci. Rep.*, **6**, 25135 (2016). DOI: 10.1038/srep25135
- [13] J.S. Xia, Y. Ikegami, Y. Shiraki, N. Usami, Y. Nakata. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 201102 (2006). DOI: 10.1063/1.2386915
- [14] P. Boucaud, M. El Kurdi, S. David, X. Checoury, X. Li, T.-P. Ngo, S. Sauvage, D. Bouchier, G. Fishman, O. Kermarrec, Y. Campidelli, D. Bensahel, T. Akatsu, C. Richtarch, B. Ghyselen. *Thin Solid Films*, **517**, 121 (2008). DOI: 10.1016/j.tsf.2008.08.146
- [15] R. Jannesari, M. Schatzl, F. Hackl, M. Glaser, K. Hingerl, T. Fromherz, F. Schäffler. *Opt. Expr.*, **22** (21), 25426 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.025426
- [16] V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M.I. Petrov, J. Schilling. *Nano Lett.*, **17** (11), 6886 (2017). DOI: 10.1021/acsnanolett.7b03248
- [17] S.A. Dyakov, M.V. Stepikhova, A.A. Bogdanov, A.V. Novikov, D.V. Yurasov, M.V. Shaleev, Z.F. Krasilnik, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius. *Laser Photonics Rev.*, **15** (7), 2000242 (2021). DOI: 10.1002/lpor.202000242
- [18] R.W. Millar, K. Gallacher, J. Frigerio, A. Ballabio, A. Bashir, I. MacLaren, G. Isella, D.J. Paul. *Opt. Expr.*, **24** (5), 4366 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.004365
- [19] V. Rutckaia, F. Heyroth, G. Schmidt, A. Novikov, M. Shaleev, R. Savelev, J. Schilling, M. Petrov. *ACS Photon.*, **8**, 209 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.0c01319
- [20] А.В. Мяконых, А.В. Шишлянников, А.А. Татаринцев, В.О. Кузьменко, К.В. Руденко, Е.С. Горнев. *Микроэлектроника*, **50** (5), 333 (2021). DOI: 10.31857/S0544126921050045 [A.V. Miakonkikh, A.V. Shishlyannikov, A.A. Tatarintsev, V.O. Kuzmenko, K.V. Rudenko, E.S. Gornev. *Russ. Microelectron.*, **50**, 297 (2021). DOI: 10.1134/S1063739721050048]
- [21] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.aqmaterials.com/aqm-silsesquioxane-polymers>
- [22] V.A. Volodin, V.A. Zinoviyev, Zh.V. Smagina, A.F. Zinovieva, E.E. Rodyakina, A.V. Kacyuba, K.N. Astantkova, K.V. Baryshnikova, M. Petrov, M.S. Mikhailovskii, M.V. Stepikhova, V.A. Verbus, A.V. Novikov. *Photonics*, **10**, 1248 (2023). DOI: 10.3390/Photonics10111248
- [23] V.M. Donnelly, A. Kornblit. *J. Vac. Sci. Technol.*, **A31**, 050825 (2013). DOI: 10.1116/1.4819316
- [24] S. Wu, H. Xia, J. Xu, X. Sun, X. Liu. *Adv. Mater.*, **47**, 1803362 (2018). DOI: 10.1002/adma.201803362
- [25] A. Goodyear, M. Boettcher, I. Stolberg, M. Cooke. *Proc. SPIE* 9428, 94280V-1 (2015). DOI: 10.1117/12.2085469
- [26] A.V. Peretokin, D.V. Yurasov, M.V. Stepikhova, M.V. Shaleev, A.N. Yablonskiy, D.V. Shengurov, S.A. Dyakov, E.E. Rodyakina, Zh.V. Smagina, A.V. Novikov. *Nanomaterials*, **13**, 1678 (2023). DOI: 10.3390/nano13101678
- [27] R. Geiger, T. Zabel, H. Sigg. *Front. Mater.*, **2**, 52 (2015). DOI: 10.3389/fmats.2015.00052
- [28] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L.C. Kimerling, J. Michel. *Opt. Lett.*, **35** (5), 679 (2010). DOI: 10.1364/ol.35.000679
- [29] J. Liu, X. Sun, D. Pan, X. Wang, L.C. Kimerling, Th.L. Koch, J. Michel. *Opt. Exp.*, **15**, 11272 (2007). DOI: 10.1364/oe.15.011272
- [30] S. Wirths, R. Geiger, N. von den Driesch, G. Mussler, T. Stoica, S. Mantl, Z. Ikonik, M. Luysberg, S. Chiussi, J.M. Hartmann, H. Sigg, J. Faist, D. Buca, D. Grützmacher. *Nat. Photon.*, **9**, 88 (2015). DOI: 10.1038/nphoton.2014.321
- [31] A. Elbaz, D. Buca, N. von den Driesch, K. Pantzas, G. Patriarche, N. Zerounian, E. Herth, X. Checoury, S. Sauvage, I. Sagnes, A. Foti, R. Ossikovski, J.-M. Hartmann, F. Boeuf, Z. Ikonik, P. Boucaud, D. Grützmacher, M. El Kurdi. *Nat. Photon.*, **14**, 375 (2020). DOI: 10.1038/s41566-020-0601-5
- [32] D. Buca, A. Bjelajac, D. Spirito, O. Concepciyn, M. Gromovyi, E. Sakat, X. Lafosse, L. Ferlazzo, N. von den Driesch, Z. Ikonik, D. Grützmacher, G. Capellini, M. El Kurdi. *Adv. Opt. Mater.*, **10** (22), 2201024 (2022). DOI: 10.1002/adom.202201024
- [33] F.T. Armand Pilon, A. Lyasota, Y.-M. Niquet, V. Reboud, V. Calvo, N. Pauc, J. Widiez, C. Bonzon, J.-M. Hartmann, A. Chelnokov, J. Faist, H. Sigg. *Nature Commun.*, **10**, 2724 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-10655-6

- [34] J.M. Hartmann, A. Abbadie, J.P. Barnes, J.M. Fedeli, T. Billon, L. Vivien. *J. Cryst. Growth*, **312**, 532 (2010). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2009.11.056
- [35] V.A. Shah, A. Dobbie, M. Myronov, D.R. Leadley. *Thin Solid Films*, **519**, 7911 (2011). DOI: 10.1016/j.tsf.2011.06.022
- [36] O. Skibitzki, M.H. Zoellner, F. Rovaris, M.A. Schubert, Y. Yamamoto, L. Persichetti, L. Di Gaspare, M. De Seta, R. Gatti, F. Montalenti, G. Capellini. *Phys. Rev. Mater.*, **4**, 103403 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.4.103403
- [37] Yu.B. Bolkhovityanov, L.V. Sokolov. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 043001 (2012). DOI: 10.1088/0268-1242/27/4/043001
- [38] D.V. Yurasov, A.N. Yablonskiy, N.A. Baidakova, M.V. Shaleev, E.E. Rodyakina, S.A. Dyakov, A.V. Novikov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 075107 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac32fe
- [39] H.-C. Luan, D.R. Lim, K.K. Lee, K.M. Chen, J.G. Sandland, K. Wada, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2909 (1999). DOI: 10.1063/1.125187
- [40] Д.В. Юрасов, А.И. Бобров, В.М. Данильцев, А.В. Новиков, Д.А. Павлов, Е.В. Скороходов, М.В. Шалеев, П.А. Юнин. *ФТП*, **49** (11), 1463 (2015). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42444> [D.V. Yurasov, A.I. Bobrov, V.M. Daniltsev, A.V. Novikov, D.A. Pavlov, E.V. Skorokhodov, M.V. Shaleev, P.A. Yunin. *Semiconductors*, **49** (11), 1415 (2015). DOI: 10.1134/S1063782615110263]
- [41] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.allresist.com/portfolio-item/e-beam-resist-ar-p-6200-series-csar-62/>