

Б. М. БЕРЕЗЯНСКИЙ

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”
E-mail: nekonosan@inbox.ruДата поступления в редакцию
19.10 2006 г.Оппонент д. т. н. Л. А. КАРАЧЕВЦЕВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Приведен обзор методов изготовления фотонных кристаллов для нанофотонных микросхем. Рассмотрены перспективы применения технологий в условиях промышленного производства таких устройств.

В последнее время наблюдается стремительное развитие разнообразных устройств радиоэлектроники: мобильные телефоны, компьютеры, в том числе и портативные, приемники, mp3-плееры и многое другое. Важнейший параметр таких устройств — скорость обработки данных, определяемая проектной нормой микросхем. Современная проектная норма, определяющая минимальный размер элемента, равна 65 нм, а в перспективе — 32 нм [1]. С другой стороны, скорость прохождения сигнала ограничивается скоростью распространения электронов. Кроме этого, любое устройство должно не только удовлетворять функциональным требованиям, но и быть компактным, удобным в использовании.

Существенное улучшение функциональных возможностей обеспечивает новое поколение устройств, основанных на распространении световых или акустических волн. Структура этих устройств подобна природной кристаллической, поэтому их можно называть кристаллоподобными. К структурам такого типа принадлежат фотонные кристаллы (ФК) для световых волн и фононные кристаллы для акустических.

ФК образован периодически чередующимися областями с различающимися оптическими свойствами. Благодаря различию коэффициентов отражения и преломления областей формируется поле определенной направленности и полосы частот, при которых световые волны не могут распространяться в ФК. Такие полосы частот называются фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ). ФК могут быть одно-, двух- и трехмерными.

В настоящее время на основе ФК разработано большое число устройств: микрополосковые линии, фильтры, мультиплексоры, световоды [2]. Это могут быть как отдельные устройства, так и несколько устройств, объединенных в одну нанофотонную интегральную микросхему (НФИМС). При проектировании таких устройств интенсивно решаются физические задачи, и лишь небольшое внимание уделяется решению конструкторско-технологических за-

дач. Поэтому на современном этапе, наряду с отдельными ФК, освоено лишь экспериментальное изготовление НФИМС и световодов [3, 4].

Поскольку размеры одного элемента НФИМС должны соответствовать современным требованиям [1], то при формировании ФЗЗ необходимо учесть возникновение небольших погрешностей. Они могут привести к значительным изменениям запрещенного для распространения волны диапазона частот, могут повлиять на направление фотонного потока, что делает устройство неработоспособным. Отсюда следуют высокие требования к изготовлению устройств на основе ФК, в частности, необходимость правильного выбора технологии и методики производства. Анализ этих методов и посвящена настоящая работа.

Рис. 1 иллюстрирует последовательность традиционной технологии изготовления ФК [5, 6]. Согласно [5], сначала необходимо подготовить плату для травления. Двойную гетероструктуру $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ выращивают на InP -подложке, используя рост из газовой фазы на основе металлоорганических соединений. Затем осаждают SiO_2 и покрывают поверхность слоем полиметилметакрилата (ПММА). Поперечное сечение платы после осаждения и нанесения покрытия показано на рис. 1, а.

После этого на пленке ПММА формируется рисунок с использованием электронно-лучевой литографии (рис. 1, б). Затем образец подвергают двум различным процессам сухого травления. Первое травление передает рисунок от ПММА на слой SiO_2 , второе травление передает его полупроводниковым пленкам (рис. 1, в, г). Остатки SiO_2 после травления удаляют жидкостным травлением с использованием плавиковой кислоты (рис. 1, д). Далее образец переворачивают и устанавливают на стеклянную пластину. Материал подложки InP и слой InGaAs удаляют двумя последовательными процессами жидкостного травления, как показано на рис. 1, е—з.

Условно эту технологию можно разделить на три основных этапа: нанесение пленок (эпитаксию), нанесение рисунка (литографию) и травление. На первом этапе определяется состав материалов ФК, на втором — его структура, на третьем удаляют пленки, которые находятся под резистом. Каждый из этих этапов может повлиять на возникновение погрешностей в ФК: 1) слои резиста могут быть нанесены неравномерно; 2) рисунок, полученный вследствие литогра-

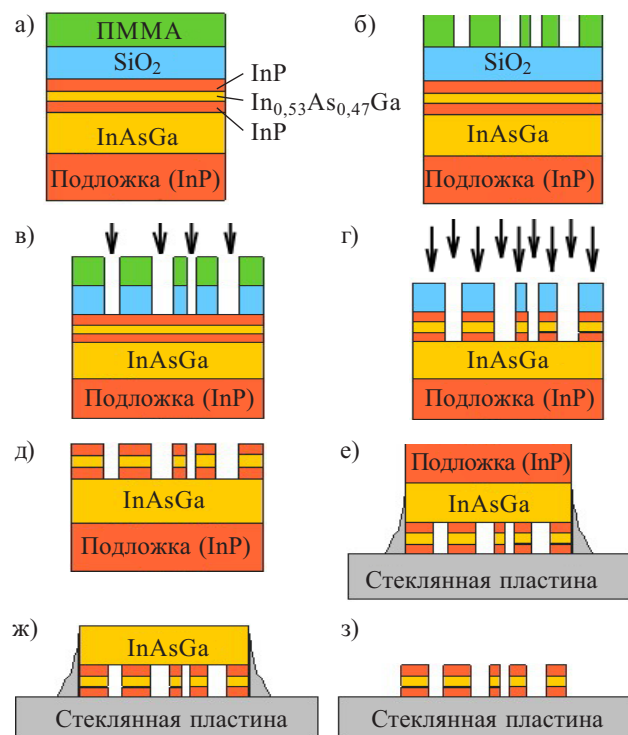


Рис. 1. Процесс изготовления двумерных ФК на полупроводниковых подложках:

а — размещение слоя SiO₂ и ПММА; б — электронно-лучевая литография; в — реактивное ионное травление; г — химическое травление с помощью ионного луча; д — оксидное жидкостное травление; е — размещение на стеклянную пластину; ж — жидкостное травление; з — травление InAsGa

фии, может иметь неровности; 3) после травления остатки материала могут создать структуру, искажающую направление прохождения световой волны. Необходимо учесть разрешающую способность литографии, время производства одного ФК-устройства и возможность изготовления одновременно нескольких устройств.

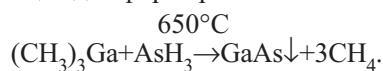
С учетом этих условий необходимо детальное рассмотрение всех методов производства ФК с возможностью выбора наиболее оптимальной их комбинации для того или иного случая.

Основными методами эпитаксии для изготовления ФК являются молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) и рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (РГФ МОС). В первом методе тонкие монокристаллические слои формируют на нагретой монокристаллической подложке за счет реакций между молекулярными или атомными пучками и поверхностью подложки. Пучки генерируются в специальных эффузионных камерах, работающих в области температур до 1400°С. В них происходит испарение требуемых материалов-реагентов. Молекулы и атомы выходят из камер через маленькие отверстия в сверхвысокий вакуум, движутся без столкновений. Высокая температура подложки способствует передвижению молекул или атомов по поверхности. В результате они занимают строго определенные положения, что необходимо для формирования высококачественных периодических структур с запрещенными зонами.

К достоинствам МПЭ следует отнести возможность формирования резких границ между слоями в многослойных структурах — в любой момент можно прервать поступление материала и начать подачу другого. Второе существенное преимущество — возможность контролировать процесс нанесения пленок, анализировать состав и структуру слоев и корректировать ошибки. Существенным недостатком метода является низкая скорость роста, что делает невозможным применение его в крупносерийном и массовом производстве.

Во втором методе, РГФ МОС, первоначально материалы (гидриды, металлоорганические соединения — металл-углеродные или металл-кислород-углеродные) поступают из специальных источников в небольшие смесительные камеры. Поскольку формирующиеся структуры могут быть многослойными и формируются они в едином цикле, то таких источников требуется несколько. Объемы смесительных камер должны быть минимальными, поскольку для формирования резких границ между слоями необходимо быстро менять состав газовой смеси.

Из камеры газовая смесь поступает в реакционную (или проточную) камеру, где под воздействием температуры и водорода, который используется в качестве газа-носителя смеси, происходят реакции разложения (пиролиза) металлоорганики. Образовавшиеся металлы реагируют на нагретой подложке с гидридами, образуя требуемые вещества. Химическая реакция для формирования пленки GaAs имеет вид



Главное достоинство метода — возможность получения структур с большой площадью; это создает условия для массового производства. Метод позволяет также формировать сверхрешетки с толщиной отдельных слоев до 1,5 нм [7].

Недостаток метода — сложность контроля загрязнения материалов пленок углеродом. Кроме того, необходимо принимать меры безопасности при работе с гидридами.

Основные методы литографии приведены на рис. 2. Фотолитография — традиционная технология, применяемая для экспериментального про-

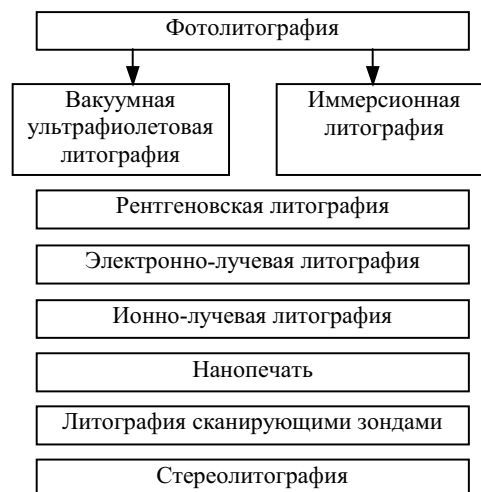


Рис. 2. Методы литографии

изводства ФК [8, 9]. Этот метод состоит в экспонировании тонкого слоя фоторезиста потоком фотонов ближней ультрафиолетовой области. Основным недостатком фотолитографии — дифракционное ограничение размеров проектной нормы размера элемента [10]. Уменьшение проектной нормы обеспечивается уменьшением длины волны экспонирующего излучения. В недавнем прошлом использовалось излучение с длиной волны 248 нм (эта технология получила название литографии на основе глубокого ультрафиолета), в настоящее время — 157 нм [11] (вакуумная ультрафиолетовая литография), при этом проектная норма составляет 65 нм.

Уменьшая длину волны лазера до 157 нм, разработчики столкнулись с тем, что излучение при передаче от источника к фоторезисту поглощается окружающей средой и линзами. Для устранения этой проблемы было решено найти такую среду, в которой луч лазера не поглощается. В результате в зависимости от выбранной среды передачи возникли два новых метода литографии: вакуумная ультрафиолетовая литография и иммерсионная литография.

При разработке метода вакуумной ультрафиолетовой литографии систему линз, которые поглощали излучение, заменили системой зеркал [12]. Отражающее покрытие каждого зеркала состоит из нескольких десятков слоев (40—81 [12]) молибдена/кремния или бора/углерода толщиной в несколько атомов каждый.

Основной принцип работы таков: лазерный луч передается от плазменного источника через зеркало на маску, от которой передает изображение рисунка топологии ФК на систему зеркал проекционной оптики — в ней рисунок многократно уменьшается. Затем изображение достигает тонкой полупроводниковой пленки (рис. 3) [12].

В настоящее время вакуумная ультрафиолетовая литография — наиболее перспективный метод для изготовления ФК наноразмеров, поскольку размер элемента в 65 нм — не предел [1]. Кроме того, она начала применяться в производстве микропроцессоров для персональных компьютеров фирмой Intel, что

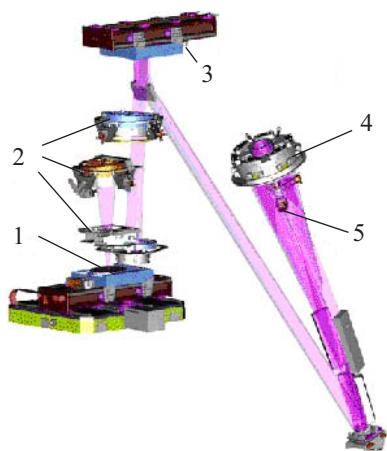


Рис. 3. Схема установки для вакуумной ультрафиолетовой литографии:

1 — полупроводниковая пленка; 2 — зеркала; 3 — шаблон; 4 — конденсор; 5 — плазма

повлечет за собой дальнейшее ее развитие и, как следствие, удешевление установок.

Заметный недостаток этого метода — сложность изготовления самих установок, что связано с тонкостью производства проектирующей системы зеркал. Особые требования предъявляются к маскам — они не должны содержать дефекты. И, наконец, необходимы системы контроля, поддерживающие вакуум достаточно высокой степени.

При разработке иммерсионной литографии было решено отказаться от работы с длиной волны экспонирующего излучения 157 нм и остановиться на длине волны 193 нм — в этом случае не требуется менять систему линз на зеркала, производство которых достаточно сложно. Основной упор разработчики сделали на среду, в которой проходило бы экспонирование, руководствуясь уравнением Рэлея [13], определяющим минимальные размеры элемента, получаемого экспонированием:

$$W = \frac{k_1 \lambda}{NA},$$

где k_1 — фактор разрешающей способности;

λ — длина волны экспонирующего излучения;

NA — числовая апертура,

$NA = n \cdot \sin \alpha$;

n — показатель преломления среды экспонирования;

α — угол восприятия линз.

Таким образом, при увеличении значения NA уменьшается минимальный размер экспонируемого элемента. Исходя из этого в качестве среды экспонирования была взята вода, которая при небольших расстояниях от источника излучения до резиста дает незначительное затухание.

Для воды $n=1,329$ (для воздуха $n=1$). При $k_1=0,25$, $\lambda=193$ нм, $\sin \alpha=0,93$ получим минимальный размер элемента:

$$W = \frac{0,25 \cdot 193}{1,329 \cdot 0,93} = 39 \text{ нм.}$$

Схема установки для иммерсионной литографии изображена на рис. 4 [13]. Пластина с резистом, а также система линз, помещаются в специальную емкость, наполненную водой. Перед применением воду очищают от нежелательных пузырьков примесей га-

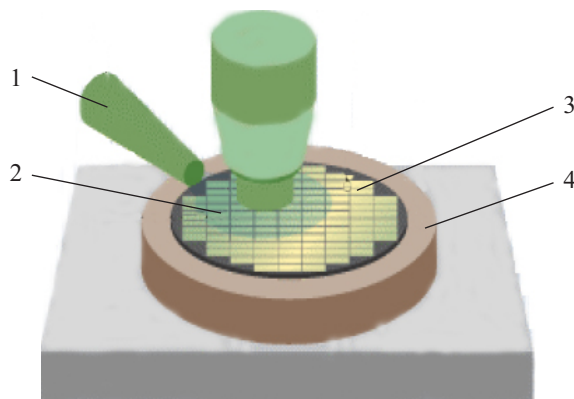


Рис. 4. Схема установки для иммерсионной литографии:

1 — вода; 2 — излучение HeNe-лазера; 3 — подложка; 4 — механизм, вращающий основание с подложкой

зов, наличие которых может привести к искажениям экспонируемого рисунка. Расстояние от системы линз до резиста должно быть до 6 мм, тогда поглощение водой экспонирующего луча будет менее 5%. Иногда в установке используют интерференцию двух лучей, благодаря чему этот метод получил еще одно название — интерференционная литография [14, 15].

Существенный недостаток метода — граничное значение размера элемента (39 нм), которое достигается только при условии применения воды. В случае перехода на технологию с использованием экспонирующего излучения с длиной волны 157 нм вода, равно как и линзы, не годится для передачи излучения к резисту. Для дальнейшего развития этой технологии необходим поиск другого вещества или таких добавок в воду, при которых не происходило бы поглощение лазерного излучения с длиной волны 157 нм. В настоящее время эта технология применяется в экспериментальном производстве ФК [16].

Другим широко распространенным методом в экспериментальном производстве ФК стала электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) [5, 6]. Установка для ЭЛЛ содержит вакуумируемую колонну с источником электронов, системой ускоряющих электродов, магнитными линзами, а также систему сканирования электронного луча по поверхности экспонируемой подложки. Системы формирования электронного луча обеспечивают создание потока электронов с энергией 20—100 кэВ, сфокусированного в пятно размером 1—1,5 нм. Луч сканирует по поверхности покрытой резистом подложки. С помощью электростатической системы записи луча, управляемой компьютерным генератором изображения, экспонирование поверхности резиста производится выборочно в соответствии с требуемой геометрией создаваемых элементов. В качестве резиста наиболее часто используют ПММА.

Для пленок металлов используется второй подход, который получил название взрывной литографии (lift-off process) [7]. На этапе подготовки маски пленка резиста экспонируется за один проход электронного луча, после чего проявляется в соответствующих химических реагентах. Затем производят осаждение пленки металла. При этом атомы и молекулы металла должны поступать к поверхности подложки в перпендикулярном направлении — чтобы пленка металла формировалась только на подложке в окнах резистивной маски и на поверхности резиста. Подготовленные таким образом структуры подвергают химической обработке в активном органическом растворителе. Оставшаяся пленка металла на подложке повторяет рисунок экспонированных областей.

Основным сдерживающим фактором применения ЭЛЛ для изготовления ФК в условиях массового производства остается невысокая скорость обработки подложек большого диаметра. С другой стороны, эта технология уже широко применяется в экспериментальном производстве ФК, что дает возможность достаточно легко внедрить ее в массовое производство.

Развитием ЭЛЛ стала ионно-лучевая литография. Применение этого метода также возможно для экспериментального изготовления ФК в лабораторных

условиях благодаря высокой разрешающей способности — до 10—20 нм [17]. Основным отличием этого метода от ЭЛЛ является применение потока ионов вместо потока электронов. Отсюда исходят и требования к ионной оптике, управлению ионным пучком, что повышает стоимость самих установок. Кроме того, процесс последовательного экспонирования ионным лучом остается слишком медленным, что также затрудняет внедрение ионно-лучевой литографии в массовое производство ФК.

Альтернативный метод изготовления наноструктур — нанопечать [18]. Этот метод использует новые подходы в изготовлении ФК — чернильную печать и тиснение с применением штампов для нанесения рисунка.

Чернильная печать (или, согласно [18], микроконтактная печать) состоит в нанесении чернил на подложку при помощи эластичного штампа. Нанесенные чернила образуют самоупорядоченную мономолекулярную пленку, которая используется в качестве шаблона при дальнейшем травлении. Штамп изготавливают из полидиметилсилоксана, чернила — из тила или его производных [7].

Метод чернильной печати имеет ряд сложностей. Во-первых, при многократном использовании эластичные штампы могут незначительно изменять свои размеры, то же происходит и при изменении температуры окружающей среды. В связи с этим приходится вместо сплошного эластичного штампа использовать тонкую эластичную пленку, нанесенную на твердый штамп. Во-вторых, при контакте штампа с подложкой происходит диффузионное размытие рисунка, которое достаточно сложно корректируется. В-третьих, поскольку пленка наносится на весь штамп, включая и боковые стенки, то образуется некоторая «шероховатость» на краях уже отпечатанного рисунка, и для достижения точности элементов рисунка необходимо дополнительное травление.

Указанные недостатки позволяют преодолеть еще одна разновидность печати — печать с наноперенесением. Основным отличием ее является нанесение чернил на горизонтальные (приподнятые или опущенные) плоскости рисунка штампа, но не на боковые стенки. В этом случае шероховатость составляет менее 5—20 нм, что вполне допустимо для многих фотонных структур [18].

Иной подход используется в тиснении. Сначала подложку, покрытую резистом, нагревают до температуры размягчения. Затем твердый штамп с необходимым рисунком под давлением делает соответствующее углубление в резистивной пленке. При этом штамп покрывают специальным соединением, чтобы он не прилип к полимеру. Остатки резиста вымывают при химическом травлении или травлении кислородной плазмой. В качестве резистивной пленки используют термопластические полимеры, зачастую ПММА.

Заметно преимущество этой группы методов для изготовления ФК — их удобство в массовом производстве. Однако они требуют применения штампов с высокой разрешающей способностью, которые, в свою очередь, изготавливаются методом ЭЛЛ [18].

Для изготовления ФК часто используется молекулярная технология, основанная на самосборках и применении сканирующих зондов или микроскопов [19]. Сначала кремниевую подложку пассивируют согласно [7, с. 33] водородом в растворе плавиковой кислоты. Затем формируют органосилановую пленку мономолекулярной толщины — таким образом, чтобы один конец молекул закреплялся на подложке, а другой образовывал новую поверхность. Эту пленку обрабатывают методом сканирующих зондов или при помощи атомного силового микроскопа. В дальнейшем на полученный рисунок закрепляют частицы палладия, высушивают, затем закрепляют частицы никеля. Металлизированная пленка служит шаблоном для дальнейшего травления.

Рассмотрим детальнее обработку пленок методом литографии сканирующими зондами. Основные принципы этого метода сходны с ЭЛЛ. В качестве резиста используется ПММА. Рисунок экспонируется потоком низкоэнергетических электронов, идущих из точечного зонда (низкоэнергетические электроны не дают рассеяния на подложке и не генерируют вторичных электронов). Во время прохождения зонда расстояние между ним и подложкой остается постоянным, не изменяется также и поток электронов. Кроме того, зонды используют для механического формирования структур в пленке резиста или для удаления материала царапанием. После экспонирования резиста с применением зонда необходимо последующее проявление и травление.

Поскольку процесс нанесения рисунка с применением одного зонда достаточно медленный, то применяют специальные головки, в которых объединены несколько зондов. Для приемлемой скорости нанесения рисунка количество зондов в одной головке должно составлять 10^4 — 10^6 [7, с. 31], причем необходимо задавать положение каждого из них относительно подложки.

Иногда вместо зондов применяют атомный силовой микроскоп, который позволяет перемещать отдельные атомы, т. е. избежать погрешностей при создании наноструктур, поскольку рисунок ФК формируется на атомарном уровне.

Для трехмерных ФК разработаны следующие три основные методики [20]. Первый подход состоит в послойном производстве, при котором отдельные двухмерные ФК получают при помощи обычных технологий литографии и травления, а потом их соединяют таким образом, чтобы получить необходимую трехмерную структуру.

Второй подход предполагает применение метода коллоидальной самосборки, при котором маленькие диэлектрические сферы, расположенные в жидкости, благодаря поверхностным силам присоединяются к плотноупакованному гранецентрированному кристаллу. Эти кристаллы могут быть заполнены веществом с высоким коэффициентом преломления. Вне такого вещества первоначальные сферы растворяются, чтобы сформировать кристаллы, подобные опалам, с полной ФЗЗ.

Третий подход состоит в применении голографической литографии, которая является развитием им-

мерсионной. Благодаря интерференции четырех лазерных лучей на светочувствительном полимере получается необходимый рисунок.

Первый метод невозможно использовать для наноразмерных ФК, поскольку погрешность при объединении нескольких слоев с размерами элементов рисунка составляет приблизительно 100 нм. Второй и третий методы широко применяются при изготовлении трехмерных ФК. Их преимущество состоит в возможности получения конечного результата за небольшой промежуток времени [20, 21].

В качестве альтернативного метода широкое развитие получила стереолитография. Это единственный метод, позволяющий проектировать и изготавливать трехмерные ФК-структуры в едином цикле [22]. Сначала модель проектируют на компьютере. Затем данные о модели передают на лазерную установку, которая будет формировать само устройство. При компьютерном проектировании в модель вводят специальные переборки, которые призваны предотвращать расслаивание модели в сложных участках, стабилизировать выступы, острые края, отделять заготовки от платформы, на которой будет находиться заготовка во время синтеза. Благодаря переборкам можно также синтезировать сложные модели по частям. Алгоритм синтеза модели изображен на рис. 5.

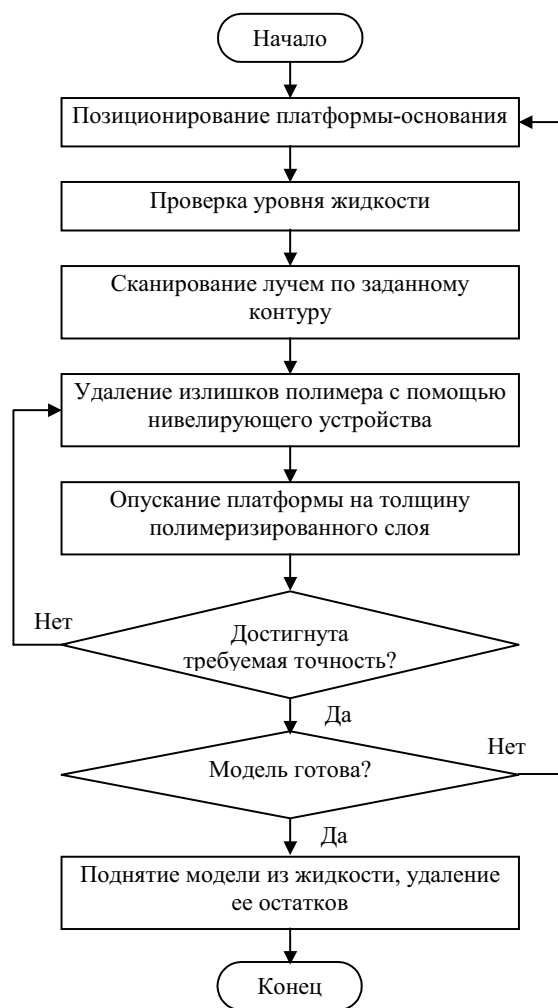


Рис. 5. Алгоритм стереолитографического синтеза модели

Заготовку (фоточувствительный полимер) погружают в специальную ванну с неполимеризованной жидкостью. Ультрафиолетовый лазер вычерчивает первое сечение. В том месте, где лазерный луч поглотился полимером, происходит отверждение (радикальная поляризация) материала. После этого заготовку опускают, рельеф ее поверхности заполняется неполимеризованной жидкостью. Нивелирующее устройство удаляет излишки жидкого полимера, и лазерный луч вычерчивает новый слой. После того, как модель будет полностью сформирована, ее поднимают над уровнем жидкости, излишки жидкости стекают. Затем модель помещается в печь для дополнительного отверждения полимера (температура 100°C). Во время процесса может измениться объем жидкости — из-за усадки полимера, поэтому уровень жидкости корректируется.

Благодаря стереолитографии можно формировать трехмерные ФК, в частности многогранные структуры (рис. 6) [22]. Кроме того, современные установки позволяют готовить исходный материал с помощью стандартных программных пакетов, например AutoCad.

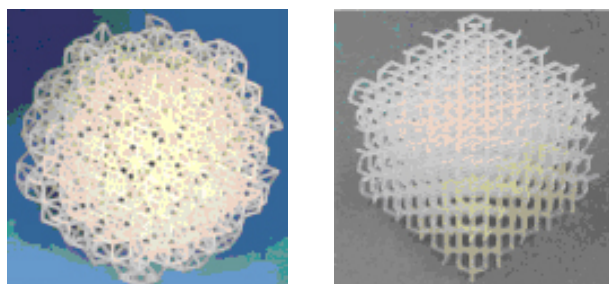


Рис. 6. Примеры трехмерных фотонных кристаллов

К основным недостаткам метода следует отнести высокую токсичность полимера и средств для чистки ванны, длительность постобработки (16 и более часов), высокую стоимость материала, установок и обслуживания установок. К недостаткам можно отнести также необходимость переборок, которые после синтеза модели нужно удалять механическим способом.

Выводы

В настоящее время внедрение фотонных кристаллов нанодиапазона в производство как нанофотонных ИМС, так и отдельных устройств на основе ФК, затруднено высокими требованиями к точности выполнения элементов, поскольку уже незначительные погрешности нарушают условия формирования запрещенных зон. К сдерживающим факторам относятся также сложные условия изготовления и тестирования опытных устройств, высокая стоимость экспериментов и длительность процесса.

Для изготовления двухмерных ФК и устройств на их основе можно применить стандартную технологию, описанную в [5]. При этом для массового производства устройств, в которых нет необходимости соблюдать предельно высокую точность, можно применять в качестве эпитаксии рост из газовой фазы с использованием МОС. Если требуется высокая точ-

ность, то необходимо применять молекулярно-пучковую эпитаксию. В качестве литографии наиболее перспективна вакуумная ультрафиолетовая литография, позволяющая получить проектную норму размера элемента менее 65 нм. Также может использоваться иммерсионная литография — при условии, что удастся подобрать жидкость, в которой интерферирующие лучи не будут рассеиваться. К тому же эти технологии уже освоены в производстве полупроводниковых ИМС. Следует, однако, иметь в виду, что эти технологии не годятся для производства трехмерных ФК-устройств с полной фотонной запрещенной зоной.

Более эффективной — с точки зрения как точности, так и скорости производства, — является молекулярная технология, которая подходит и для трехмерных ФК. Однако метод является громоздким, и пока нет перспектив его внедрения в массовое производство. Альтернативным методом производства трехмерных ФК может стать стереолитография, которая уже успешно применяется в мелкосерийном производстве.

Промышленное освоение ФК-устройств нанодиапазона требует тщательной физико-технической, конструктивно-технологической и организационно-экономической подготовки производства. Кроме того, требуется также значительно большее количество разработанных устройств на основе ФК нанодиапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Thompson G. An Intel perspective on silicon nanoelectronic // Technology and Manufacturing Group, Intel. — 2004.
2. Нелин Е. А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 3. — С. 18—25.
3. Dumon P., Bogaerts W., Van Campenhout J. et al. Low-loss photonic wires and compact ring resonators in silicon-on-insulator // Proceedings Symposium IEEE/LEOS. — Benelux Chapter. — 2003. — P. 5—8.
4. Желтиков А. М. Дырчатые волноводы // Успехи физических наук. — 2000. — Т. 170, № 11. — С. 1203—1215.
5. Alvarado-Rodriguez I. Fabrication of two-dimensional photonic crystal single-defect cavities and their characterization by elastic scattering // A dissertation ... Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. — Los Angeles, University of California. — 2003.
6. Loncar M., Doll T., Vukobratovic J., Scherer A. Design and fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides // Journal of Lightwave Technology. — 2000. — Vol. 18, N 10. — P. 1402—1411.
7. Нанoeлектроника. В 3 ч. Ч. 2. Нанотехнология // В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева. — Мн.: БГУИР, 2003.
8. Carter-Coman C., Brown A. S., Bicknell-Tassius R. et al. Strain-modulated epitaxy: modification of growth kinetics via patterned, compliant substrates // J. Vac. Sci. Technol. — 1996. — Vol. B 14(3). — P. 2170—2174.
9. Smith H. A., Rebert M., Sternberg O. Design infrared filters using stacked metal lattices // Appl. Phys. Lett. — 2003. — Vol. 82, N 21. — P. 3605—3607.
10. Рындин Е. А., Коноплёв Б. Г. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование. — Таганрог: ТРТУ, 2001.
11. Borodovsky Y., Schenker R., Allen G. et al. Lithography strategy for 65 nm node // <http://apps.intel.com>
12. Extreme ultraviolet lithography. Imaging the Future // EUVL Progress Report S&TR. — 1999. — P. 4—9.
13. Park J. H. The interaction of ultra-pure water and photoresist in 193 nm immersion lithography // 22nd Annual Microelectronic Engineering Conference. — 2004. — P. 34—39.

14. Carter J. M., Fleming R. C., Savas T. A. et al. Interference lithography // MTL Annual Report.— 2003.— P. 186—188.

15. Brueck S. R. J. Optical and interferometric lithography — nanotechnology enables // Proceeding of the IEEE.— 2005.— Vol. 93, N 10.— P. 1704—1721.

16. Divliansky I., Mayer Th. S., Holliday K. S. et al. Fabrication of three-dimensional polymer photonic crystal structures using single diffraction element interference lithography // Appl. Phys. Lett.— 2003.— Vol. 82, N 11.— P. 1667—1669.

17. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике.— К.: МП Леся, 2002.

18. Rogers J. A. Photonic applications of printed and molded nanostructures// Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology.— 2004.— P. 2869—2878.

19. Bryant G. W., Shirley E. L., Goldner L. S. Theory of probing a photonic crystal with transmission near-field optical microscopy // Physical Review B.— 1998.— Vol. 58, N 4.

20. Johnson S. G., Joannopoulos J. D. Introduction to photonic crystals: Bloch's theorem, band diagrams and gaps (but no defects) // MIT.— 2003.

21. Meisel D. C., Wegener M., Busch K. Three-dimensional crystals by holographic lithography using the umbrella configuration: symmetries and complete photonic band gaps // Physical Review.— 2004.— Vol. B 70.— P. 165104-1—165104-10.

22. Weining M., Megens M., Steinhart P. J. et al. Experimental measurement of the photonic properties of icosahedral quasicrystals // Nature.— 2005.— Vol. 436, Issue 7053.— P. 993—996.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



Министерство образования и науки Украины
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
(Приборостроительный факультет)

Шестая научно-техническая конференция «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ»

24—25 апреля 2007 г.

г. Киев, Украина

Тематика конференции

Секция 1. Теория и практика навигационных приборов и систем

Секция 2. Оптические и оптико-электронные приборы и системы

Секция 3. Процессы изготовления приборов, методы и способы их контроля

Секция 4. Теория и проектирование наноприборов и систем измерения механических величин и наноперемещений

Секция 5. Аналитическое и экологическое приборостроение

Секция 6. Биомедицинское приборостроение и технологии

Секция 7. Неразрушающий контроль, техническая и медицинская диагностика

Секция 8. Приборы и системы учета расхода энергоносителей

Секция 9. Информационные технологии в приборостроении и микропроектировании

Секция 10. Optical instruments and systems

Рабочие языки конференции —
украинский, русский

Ученый секретарь Т. Р. Ключко
тел.: (044) 241-86-02
e-mail: klotchko@psf.ntu-kpi.kiev.ua



НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. Издание второе, исправленное и дополненное.— М.: Техносфера, 2006.— 160 с.

Прогресс в микроэлектронике связывают с уменьшением линейных размеров функциональных элементов. Если их размеры становятся порядка нанометров, то существенными являются квантовые эффекты, принципиально меняющие физику работы. Созданием таких элементов и интегральных квантовых схем на их основе занимается нанотехнология.

В монографии изложены физические основы зондовой нанотехнологии на базе сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов, показаны основные достижения, обсуждаются проблемы, требующие решения.

Предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых, желающих познакомиться с новым научным направлением и попробовать свои силы в развитии технологии XXI века.

