

## ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

*Орехов А.И.*

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
филиал «Минский радиотехнический колледж»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Кусенок Е.Н. – преподаватель высшей категории дисциплин общепрофессионального  
и специального циклов, председатель ЦК «Микро- и наноэлектроника»*

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены преимущества фотонных интегральных схем, виды фотонных кристаллов (ФК), изготовление кремниво-германиевой гексагональной структуры, пригодной для создания кремний-совместимого лазера.

**Ключевые слова:** фотонные кристаллы, кремниво-германиевая структура, фотонная интегральная схема.

Основой электронных устройств будущего могут стать фотонные кристаллы – это синтетические упорядоченные материалы, в которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется внутри структуры. В кристаллической решетке традиционного полупроводника регулярность, периодичность расположения атомов приводит к образованию так называемой зонной энергетической структуры – с разрешенными и запрещенными зонами. Электрон, энергия которого попадает в разрешенную зону, может передвигаться по кристаллу, а электрон с энергией в запрещенной зоне оказывается «запертым».

По аналогии с обычным кристаллом возникла идея кристалла фотонного. В нем периодичность диэлектрической проницаемости обуславливает возникновение фотонных зон, в частности, запрещенной, в пределах которой распространение света с определенной длиной волны подавлено. То есть, будучи прозрачными для широкого спектра электромагнитного излучения, фотонные кристаллы не пропускают свет с выделенной длиной волны (равной удвоенному периоду структуры по длине оптического пути).

Фотонные кристаллы делятся на одномерные, двумерные и трехмерные. Одномерными являются фотонные кристаллы с чередующимися слоями из разных материалов, что можно наблюдать на рисунке 1.

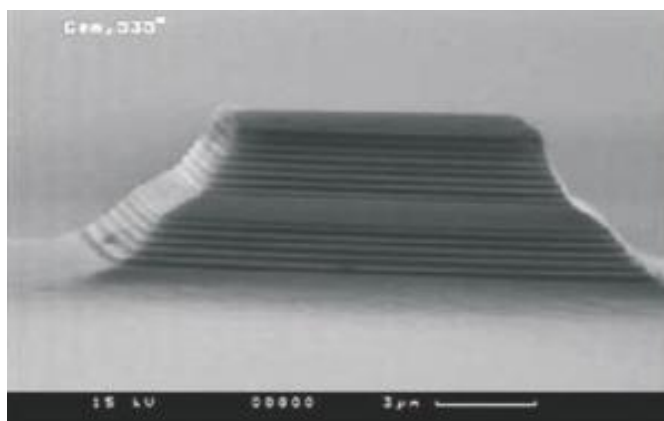


Рисунок 1 – Электронный снимок одномерного ФК

Двумерные фотонные кристаллы могут иметь более разнообразные геометрии. К ним, например, можно отнести массивы бесконечных по длине цилиндров (их поперечный размер много меньше продольного) или периодические системы цилиндрических отверстий как представлено на рисунке 2.

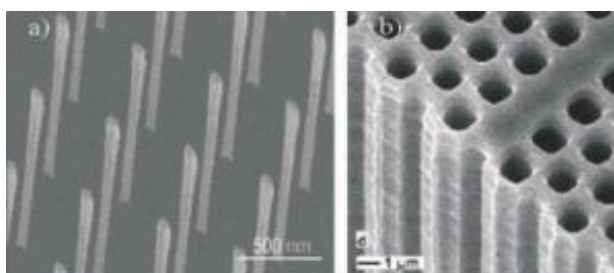


Рисунок 2 – Электронные снимки, двумерного прямого и обратного ФК с треугольной решеткой

Структуры трехмерных фотонных кристаллов весьма разнообразны. Наиболее распространенными в этой категории являются искусственные опалы – упорядоченные системы сферических рассеивателей. Различают два основных типа опалов: прямые и обратные (inverse) опалы. Переход от прямого опала к обратному опалу осуществляется заменой всех сферических элементов полостями (как правило, воздушными), в то время как пространство между этими полостями заполняется каким-либо материалом [3].

Ниже, на рисунке 3 представлена поверхность ФК, представляющего собой прямой опал с кубической решеткой на основе самоорганизованных сферических микрочастиц полистирола.

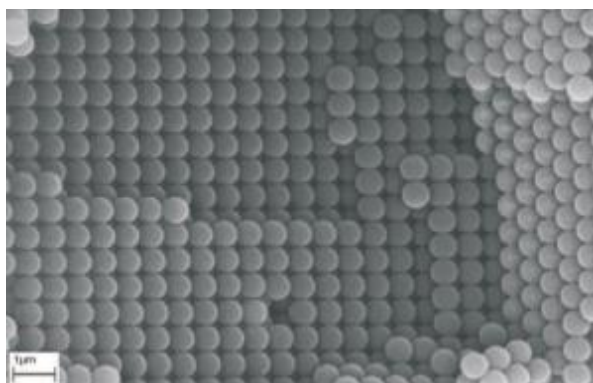


Рисунок 3 – Внутренняя поверхность ФК с кубической решеткой на основе самоорганизованных сферических микрочастиц полистирола.

Следующая структура, рисунок 4, представляет собой инверсный опал, синтезированный в результате многостадийного химического процесса: самосборки полимерных сферических частиц, пропитки пустот полученного материала веществом и удалением полимерной матрицы путем химического травления.

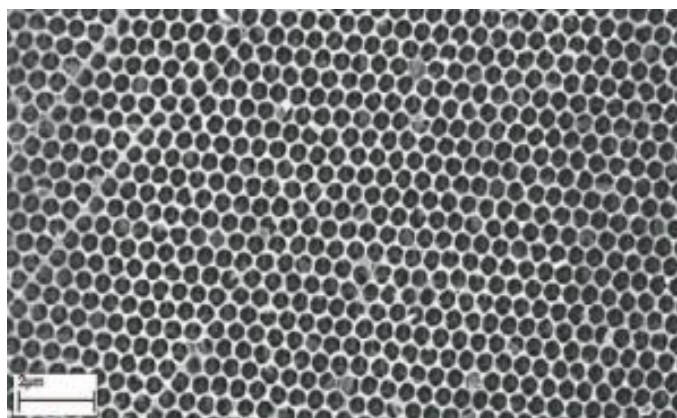


Рисунок 4 – Поверхность кварцевого инверсного опала. Фотография получена с помощью сканирующей электронной микроскопии.

При изучении свойств фотонных интегральных схем был отмечен целый ряд достоинств [2]:

- большое быстродействие (широкую полосу пропускания) в сравнении со схемами из электрических компонент, что объясняется большей частотой световой волны и меньшими размерами (меньшими емкостями) элементов фотонных интегральных схем;

- низкая емкость элементов оптических схем, позволяющих обеспечить быстродействие и ширину полосы модуляции;

- отсутствие у фотонов массы и электрического заряда в отличие от электронов, а значит, меньшее взаимодействие с кристаллической решеткой материала, через который они проходят, сократит выделение энергии, потребление энергии микросхемами снизится;

- при локализации нескольких устройств, реализующих несколько функций на одной подложке, фотонные интегральные схемы устойчивы и после первой настройки не требуют корректировки. Перечисленные свойства заставляют задуматься над созданием лазера на основе кремния и заставить работать фотоны, вместо электронов. Фосфид индия и оксид титана – материалы, пригодные для создания фотонных кристаллов, но использовать их как полупроводниковый материал вместо кремния не возможно по ряду причин.

Проблема с лазером на основе кремния в первую очередь связана с его типом кристаллической решетки. Если бы удалось синтезировать материал на основе кремния, у которого решетка обеспечивала бы прямую запрещенную зону, то такой материал был бы пригоден для создания лазера. Для этого его решетка должна быть гексагонального типа. И такой решеткой, как оказалось, обладает кремний, легированный германием.

Вырастить гексагональную кремниевую структуру совсем непросто [4]. Первым шагом стало создание нанопроволоки из материала с гексагональной кристаллической решеткой. Далее, вокруг этой проволоки вырастили кремниво-германиевую оболочку, причем атомы кремния занимали положения таким образом, чтобы соответствовать матрице атомов проволоки. В результате – получен кремний гексагональной структуры, представленной на рисунке 5.

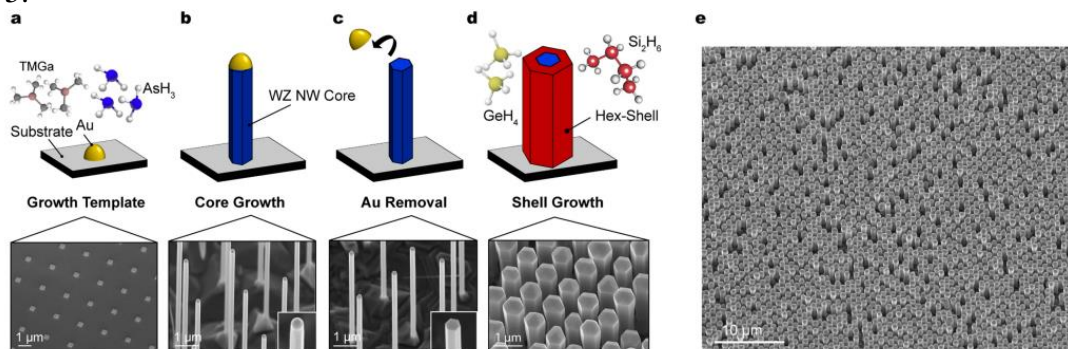


Рисунок 5 – Процесс создания структуры

В ходе исследований кристаллической решетки кремния был разработан способ изготовления нового материала на основе легирования кремния германием. В настоящее время проверяются возможности его применения в кремний-совместимых лазерах. С изобретением нового лазера будут решены проблемы использования обычных полупроводников в микросхемах, связанные с их нагревом, будет снижено потребление энергии и обеспечено лучшее быстродействие интегральных микросхем.

### Список литературы

1. Atabaki, A. H. et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip. *Nature* **556**, 349–354 (2018).
2. Cheben, P., Halir, R., Schmid, J. H., Atwater, H. A. & Smith, D. R. Subwavelength integrated photonics. *Nature* **560**, 565–572 (2018).
3. Cartoixa, X. et al. Optical emission in hexagonal SiGe nanowires. *Nano Lett.* **17**, 4753–4758 (2017)
4. Rödl, C. et al. Accurate electronic and optical properties of hexagonal germanium for optoelectronic applications. *Phys. Rev. Mater.* **3**, 034602 (2019).