

ЛАЗЕРНО-СТИМУЛИРОВАННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СУПЕРКРИСТАЛЛОВ ИЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ**Каранчук Д.Я., Скапцов А.С., Юревич Ю.В.****Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
г. Могилёв, Беларусь**

В последнее десятилетие привлечено все возрастающее внимание к так называемым метаматериалам, новому классу объектов, не существующих в природе. Суперкристаллы регулярно расположенных дипольных квантовых излучателей (в частности, экситонов) представляют собой один из примеров таких объектов, оптические свойства которых могут легко контролироваться изменением формы и химического состава компонентов их составляющих, а также геометрией решетки. Среди них дихалькогениды переходных металлов, которые представляют собой полупроводники типа MX_2 , где M представляет собой атом переходного металла (например, Mo или W), а X представляет собой атом халькогена (например, S , Se или Te). Важно то, что подобные вещества, вроде $MoSe_2$, WSe_2 и др., имеют ширину запрещенной зоны от ближней инфракрасной до видимой области. Было показано, что в пределе квазимонослоя размером (толщиной) до десятка межатомных расстояний эти материалы обладают прямой запрещенной зоной, что хорошо подходит для приложений фотоники и оптоэлектроники [1].

Установлено, что монослой $MoSe_2$ в области резонанса полностью отражает падающий свет – в сущности, является идеальным зеркалом, имеющим атомную толщину [2]. Показано, что это зеркало внутренне бистабильно [3], т. е., его отражательная способность может быть переключена малым изменением внешнего сигнала. Таким образом, планарные физические образцы из этих веществ способны обладать уникальными транспортными и оптическими свойствами именно в формате наноразмеров. Их привлекательность также заключается в том, что в подавляющем большинстве они – полупроводники, энергетическая структура которых может легко управляться внешним воздействием, что делает их перспективными с точки зрения оптических нанотехнологических разработок и нанофотоники.

В представленном материале проанализирована возможность применимости методов лазерной модификации плоских образцов халькогенидных стекол с целью формирования приповерхностных низкоразмерных квазикристаллов, которые можно использовать в качестве планарных многослойных интерференционных зеркал, пассивных модуляторов или нелинейных резонаторов.

Известно, что темп вынужденной кристаллизации при нагреве планарного слоя стекол состава $Se-Te$ или $Al-Se-Tn$ аргоновым лазером ($\lambda \approx 0.46 \dots 0.51$ мкм) и достижении температуры 373 К возрастает примерно в 25 раз по отношению скорости фазового перехода в отсутствие облучения и тривиальной термической кристаллизации. Для пленок из стекла, активированных составом $Ge_{15}As_4Te_{81}$, время полного перехода в кристаллическое состояние при термическом нагреве сильнопоглощаемым излучением СО лазера ($\lambda \approx 10.6$ мкм) снижалось в 4 раза при температуре $338 \dots 353$ К. Для этих же условий для аморфных слоев с составом As_2Se_3 $AsSe_{1.5}Bi_{0.1}$ скорость кристаллизации возрастает более, чем в 30 раз.

В этой связи более важным представляется то, что лазерно-стимулированная кристаллизация, ускоряя зарождение и рост кластеров в структуре материала, способна обусловить в них происходящую в поле вынужденного излучения ориентацию полярных

группировок. Расчетными оценками показано, что дипольно-эластичная релаксационная поляризация повышает вероятность разрыва дипольных цепочек на более короткие и их укладку в кристаллическую решетку. Установлено, что типичная для халькогенов сильная спин-орбитальная связь приводит к формированию в матрице основного вещества экситонов или мета-атомов. В последнем случае эти образования превышают обычный размер атома (возможно, на два порядка и более), но при размере до нескольких нанометров обладают подобно экситонам дискретными свойствами энергетического спектра. В более «инертной» матрице это – излучающие или активно реагирующие на излучение элементы, которые допускают более или менее простую модельную форму (например, элементарного диполя). Подобные активные центры носят название квантовых точек (КТ), их образованием определены квантово-размерные свойства полупроводниковых структур, работающих, например, в двух спектральных диапазонах, которые используются в локальных быстродействующих волоконно-оптических линиях связи на основе кварцевого волокна: 850 нм на основе гетероструктур *AlGaAs* и 650 нм на основе гетероструктур *AlGaInP*. При условии плотной и регулярной упаковки КТ низкоразмерный слой приобретает выраженную способность нелинейного резонансного рассеяния электромагнитного излучения.

Планарные структуры из подобных слоев особо перспективны для разработки зеркал в виде распределенных брэгговских отражателей для формирования вертикального оптического микрорезонатора Фабри–Перо в схеме обратной связи вертикально излучающих лазеров (ВИЛ). Они обладают рядом существенных достоинств по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции [4] и нашли широкое применение в оптических сенсорах и устройствах обработки информации. К числу преимуществ ВИЛ относятся миниатюрные размеры, малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, возможность достижения крайне малых (субмиллиамперных) пороговых токов, повышенная температурная стабильность длины волны лазерного излучения, рекордно высокие частоты прямой токовой модуляции (десятки ГГц), возможность формирования планарных массивов ВИЛ с высокой плотностью КТ, групповая технология изготовления и возможность тестирования приборов до разделения пластины на отдельные кристаллы. В последних трех случаях применение лазерно-стимулирующих технологий особо оптимально. В большинстве современных ВИЛ различных спектральных диапазонов успешно используются активные области на основе кластеров из КТ – одной или нескольких квантовых ям, помещенных вблизи пучностей оптического поля. При этом активная область источника (область протекания тока и излучательной рекомбинации носителей) может быть ограничена до размера нанометров с помощью создания селективно-оксидированных апертурных слоев *TeGaAs* или с помощью имплантации протонов.

Список использованных источников

1. Mak, K.F. Photonics and optoelectronics of 2D semi-conductor transition metal dichalcogenides / K.F. Mak, J. Shan // *Nature Photonics*. – 2016. – V.10. – P. 216-226.
2. Large Excitonic Reflectivity of Monolayer *MoSe₂* Encapsulated in Hexagonal Boron Nitride / G. Scuri [et al] // *Phys. Rev. Letters*. – 2018. – V. 120. – No 037402.
3. Realization of an Electrically Tunable Narrow-Bandwidth Atomically Thin Mirror Using Monolayer *MoSe₂* / P. Back [et al] // *Phys. Rev. Letters*. – 2018. – V. 120. – No 037401.
4. Vertical-cavity surface-emitting lasers based on submonolayer *InGaAs* quantum dots / S.A. Blokhin [et al] // *IEEE J. Quantum Electron*. – 2006. – V. 42, No. 9. – P. 851–858.