

Д. т. н. И. Е. МАРОНЧУК, к. ф.-м. н. А. Д. КУЧЕРУК,  
С. Ю. ЕРОХИН, И. В. ЧОРНЫЙ

Украина, г. Херсон, Гос. технический университет  
E-mail: phisel@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
09.10 2002 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. В. ОДИНЦОВ  
(Гос. пед. ун-т, г. Херсон)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СОЕДИНЕНИЙ $A^3B^5$ В ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ

*Продемонстрирована возможность создания различных типов датчиков давления на низкоразмерных структурах. Представлены экспериментальные результаты исследования эпитаксиальных слоев.*

Бурное развитие автоматизированных систем сдерживается отставанием технологии датчиков от современных достижений в области физики полупроводников и полупроводникового производства. При решении этой проблемы важнейшее значение приобретает вопрос о выборе материала.

Весьма перспективными материалами являются полупроводниковые соединения  $A^3B^5$  и их твердые растворы. Обладая уникальным набором физических свойств, эти полупроводники, по сравнению с кремнием и другими элементарными полупроводниками, обеспечивают существенно более широкий выбор материалов для изготовления датчиков с улучшенными характеристиками. Большие потенциальные возможности использования полупроводников  $A^3B^5$  связаны прежде всего с созданием гетероструктур и гетеропереходов [1], а также низкоразмерных структур (НС) на их основе.

Несмотря на лавинообразный поток публикаций, посвященных НС, лишь в очень редких случаях указываются перспективы их использования в датчиках и, в частности, в датчиках давления. Между тем НС обладают рядом уникальных особенностей, отсутствующих в объемном материале и позволяющих существенно улучшить параметры датчиков давления. Использование НС (сверхрешеток, квантовых ям, квантовых нитей, квантовых точек, двухбарьерных квантовых структур и т. д.) особенно перспективно для создания миниатюрных датчиков давления. Кроме того, что НС наиболее полно соответствуют направлению микроминиатюризации, при их использовании появляется целый ряд дополнительных преимуществ. В частности, обеспечивается существенное повышение пространственного разрешения, увеличение чувствительности, расширение динамического диапазона.

Концентрация носителей заряда в полупроводниках и способность их перемещаться под действием приложенного электрического поля, явления поглощения и излучения света определяются особенностями строения зонного энергетического спектра конкретных кристал-

лов. В искусственных НС, состоящих из различных полупроводников со слоями толщиной порядка нескольких нанометров, открывается возможность управления энергетической структурой, так что даже появился термин «зонная инженерия». Физические явления, лежащие в основе функционирования НС, принципиально отличаются от используемых в традиционной микроэлектронике. Техническая реализация этих явлений в полупроводниковых приборах и, в частности, в датчиках давления, безусловно, будет одним из самых блестящих достижений нашего столетия.

Целью настоящей работы было проанализировать низкоразмерные эффекты с точки зрения создания различных типов датчиков давления и, основываясь на проведенном анализе, предложить принципиально новые пути оптимизации их основных характеристик, а также осуществить выращивание квантово-размерных структур, максимально приближенных к оптимальным.

Практически невозможно даже перечислить все имеющиеся место в НС эффекты, которые могут быть использованы в датчиках давления. Тем не менее следует выделить три весьма широких группы явлений, возникающих под воздействием одноосного или гидростатического давления:

1. Изменение спектральной зависимости фото- и электролюминесценции квантовых ям, сверхрешеток и квантовых точек [2—5].

2. Резкое изменение интенсивности фото- и электролюминесценции, концентрации и подвижности носителей заряда в НС при переходе от прямой к непрямой структуре энергетических зон [2—7].

3. Изменение условий туннелирования через квантово-размерные структуры (например, двухбарьерные структуры с квантовой ямой или многослойные структуры), приводящее к изменению вольт-амперных и частотных характеристик этих структур [8, 9].

Влияние давления на люминесценцию GaAs/AlGaAs квантовых ям весьма подробно исследовано в работе [3].

Отличительной особенностью квантовых ям от объемного материала является наличие сильных и узких линий в оптическом спектре при температурах вплоть до комнатных и даже выше. Более того, эти линии обязаны своим происхождением свободным экситонам и поэтому должны зависеть только от ширины и глубины квантовых ям. В объемных полупроводниках, даже наиболее

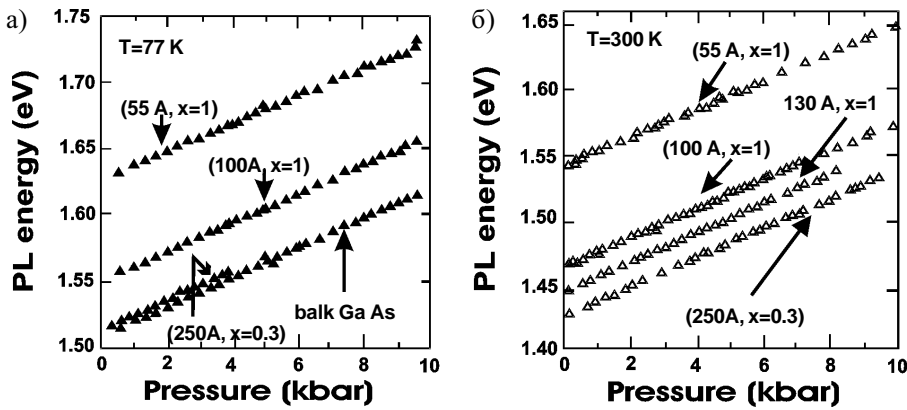


Рис. 1. Зависимости положений максимумов фотолюминесценции в квантовых ямах GaAs/AlGaAs различной ширины от гидростатического давления:  
а – при 77 К; б – при 300 К

чистых, в спектрах люминесценции имеется много особенностей, связанных с примесями. По этой причине изучение квантовых ям иногда дает более надежную информацию о параметрах материала ямы, нежели прямое изучение объемного материала.

Весьма привлекательным для измерения величины гидростатического давления представляется использование смещения максимумов люминесценции в квантовых ямах под его воздействием.

На рис. 1 представлены зависимости положений максимумов фотолюминесценции (ФЛ) в квантовых ямах различной ширины от гидростатического давления при температурах 77 и 300 К. Видно, что, во-первых, величина вызванного давлением смещения максимумов ФЛ практически не зависит от температуры, а во-вторых, она почти линейно зависит от гидростатического давления в широком динамическом диапазоне.

Обнаружено незначительное уменьшение влияния давления на смещение максимума ФЛ в квантовых ямах по сравнению с объемным материалом, вызванное, во-первых, изменением эффективной массы носителей тока, во-вторых, увеличением энергии связи экситона и, в-третьих, уменьшением ширины квантовой ямы. Первый фактор доминирует в узких квантовых ямах, где это уменьшение наиболее выражено. Оно линейно зависит от давления и легко может быть учтено. Так что по сдвигу максимума ФЛ в квантовых ямах можно судить о величине гидростатического давления. Однако такой метод имеет определенные неудобства, т. к. для измерения давления всего в одной точке нужно снимать спектральную зависимость ФЛ в двух точках (при давлении  $P=0$  и при измеряемом давлении). Причем измерения спектров ФЛ усложняются сильным изменением интенсивности ФЛ при изменении температуры или (особенно вблизи  $\Gamma$ - $X$ -резонанса) приложенного давления. Поэтому такой метод вряд ли найдет широкое применение в датчиках давления и может быть рекомендован лишь для калибровки датчиков.

Во многих работах отмечается очень сильное (на порядки величины) уменьшение интенсивности люминесценции в сверхрешетках, квантовых ямах и точках в области перехода от прямой к непрямой структуре энергетических зон [2–7]. В принципе, этот эффект может быть использован в датчиках давления (причем как одноосного, так и гидростатического). Привлекает здесь достаточно высокая чувствительность к давлению и возможность использо-

вания измерения интегральной интенсивности люминесценции (а не спектральных характеристик, как в предыдущем случае), что может быть выполнено при помощи, например, обычного кремниевого фото диода. При использовании комбинированной монокристаллической структуры "светодиод — HC — фото диод" отпадает необходимость в оптическом доступе к структуре, что может существенно удешевить такой датчик. Однако сильная нелинейность этого эффекта и значительное влияние температуры на интенсивность люминесценции, по-видимому, потребуют встраивания микропроцессоров и датчиков температуры в такие датчики давления для калибровки и температурной компенсации сигнала.

На рис. 2 представлены спектры фотолюминесценции  $(\text{GaAs})_{12}(\text{AlAs})_{12}$ -сверхрешетки (нижним индексом обозначено количество монослоев) при температурах 293 и 80 К. В такой сверхрешетке  $X$ -долина находится примерно на 0,04 эВ ниже  $\Gamma$ -долины (с увеличением числа монослоев  $\Gamma$ -долина опускается быстрее, чем  $X$ -долина, и при 15 монослоях  $X$ - и  $\Gamma$ -

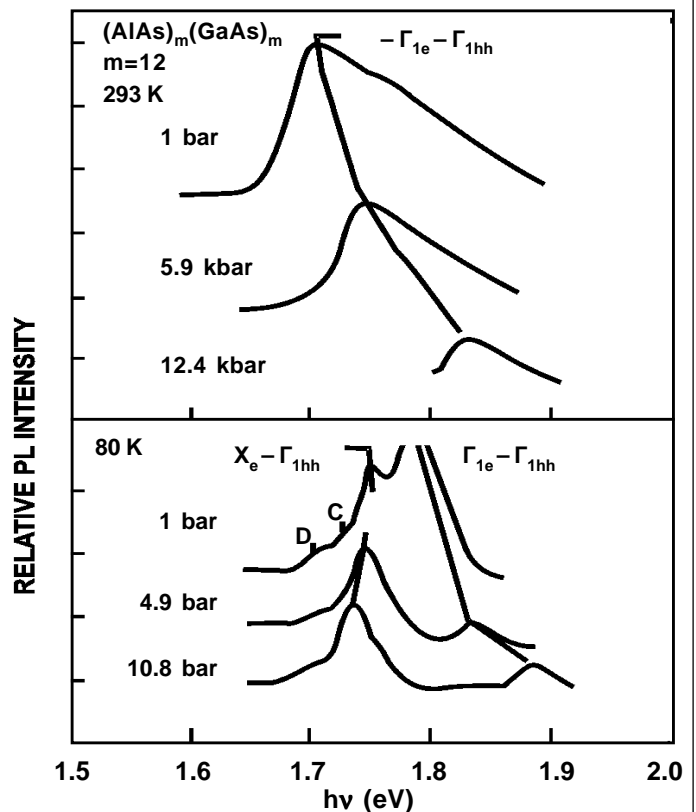


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции  $(\text{GaAs})_{12}(\text{AlAs})_{12}$ -сверхрешетки при 293 и 80 К

долины оказываются приблизительно на одном уровне, т. е. имеет место так называемый Г—Х-резонанс). Из рисунка видно, что при 293 К имеется один максимум ФЛ, причем он соответствует переходам между  $\Gamma_{1c}$ -долиной и долиной тяжелых дырок  $\Gamma_{1hh}$  в слое GaAs. При 80 К возникает дополнительный пик ФЛ, связанный с переходами  $X_c$ — $\Gamma_{1hh}$ , где  $X_c$ , как полагают авторы работы [7], это нижайший ограничительный потенциал в AlAs-слое. По нашим оценкам, это, скорее всего, двукратно вырожденный уровень  $X_c$ -долин в слое GaAs, большая ось которых (ось вращения) направлена перпендикулярно плоскости сверхрешетки, и в этом направлении достаточно большая эффективная масса ( $m \approx 1,3m_0$  [9, с. 107]) и, соответственно, низкое энергетическое положение.

При комнатной температуре  $T=293$  К электроны из  $X_c$ -долин относительно легко забрасываются в  $\Gamma_{1c}$ -долину и, вследствие значительно большей вероятности прямого излучательного перехода, нежели непрямого, наблюдается лишь один пик ФЛ, который, судя по смещению максимума под действием давления, связан с  $\Gamma_{1c}$ — $\Gamma_{1hh}$ -переходами. При 80 К уменьшается термический заброс электронов из  $X_c$ -долины в  $\Gamma_{1c}$ -долину, что и приводит к появлению двух пиков в спектре ФЛ, один из которых под действием давления смещается в область больших энергий, что соответствует  $\Gamma_{1c}$ — $\Gamma_{1hh}$ -переходам, а другой — в область меньших ( $X_c$ — $\Gamma_{1hh}$ -переходы). Как видно из рисунка, интенсивность ФЛ, связанная с  $\Gamma_{1c}$ — $\Gamma_{1hh}$ -переходами, сильно зависит от давления (отметим, что интенсивность ФЛ на графике дана в логарифмическом масштабе).

Таким образом, на основе  $(GaAs)_{12}(AlAs)_{12}$ -сверхрешетки можно получить высокочувствительный датчик давления, работающий при достаточно высоких температурах. Поскольку Г—Х-резонанс в сверхрешетках с большим периодом решетки имеет место при больших давлениях, то, путем создания сверхрешетки с линейно увеличивающимся периодом, можно значительно повысить линейность и расширить динамический диапазон таких датчиков. Например, при использовании сверхрешетки с увеличивающимся числом монослоев от  $(GaAs)_{12}(AlAs)_{12}$  до  $(GaAs)_{18}(AlAs)_{18}$  можно, по нашим оценкам, расширить динамический диапазон приблизительно на 10 кбар.

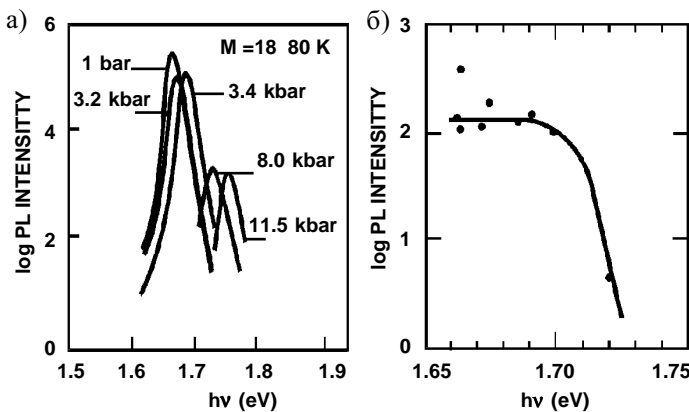


Рис. 3.

*a* — спектры ФЛ в зависимости от приложенного давления; *b* — изменение интенсивности ФЛ в зависимости от смещения максимума ФЛ, вызванного гидростатическим давлением

Иллюстрацией этому является рис. 3, на котором изображены спектры ФЛ в зависимости от приложенного давления (рис.3, *a*) и изменение интенсивности ФЛ в зависимости от смещения максимума ФЛ, возникающего под действием давления (рис. 3, *b*). Измерения проводились на сверхрешетке  $(GaAs)_{18}(AlAs)_{18}$  при температуре 80 К.

В отличие от  $(GaAs)_{12}(AlAs)_{12}$ , где Г—Х-резонанс имеет место уже в отсутствие давления, в этой сверхрешетке спад интенсивности ФЛ, связанный с Г—Х-резонансом, происходит при смещении максимума ФЛ на величину порядка 0,06 эВ, что соответствует давлению 7—8 кбар.

Пожалуй, еще больший интерес в плане повышения температурной стабильности датчиков представляют исследования влияния гидростатического давления на фотолюминесценцию  $In_{0,55}Al_{0,45}As/Al_{0,5}Ga_{0,5}As$  квантовых точек. На рис. 4 показаны изменения энергетического положения пиков фотолюминесценции D1, D2 и D3 под действием гидростатического давления для квантовых точек толщиной порядка 10 монослоев и латеральными размерами, соответственно, 26, 52 и 62 нанометров. На вставке показано изменение интенсивности ФЛ квантовых точек под воздействием давления при температуре 15 К.

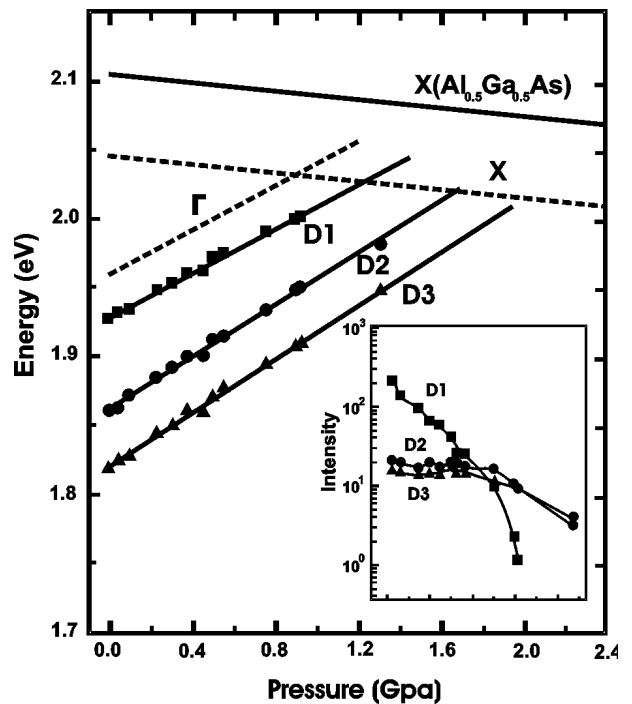


Рис. 4. Изменение энергетического положения пиков фотолюминесценции под действием гидростатического давления (сплошные кривые — аппроксимация методом наименьших квадратов)

Видно, что на основе квантовых точек могут быть созданы как датчики давления 1-й группы (вследствие хорошей линейности зависимости положения максимумов ФЛ от давления), так и 2-й группы, в которых измеряется спад интегральной интенсивности ФЛ в области Г—Х-резонанса. Наибольшей чувствительностью к давлению обладает интегральная интенсивность ФЛ квантовых точек с минимальным латеральным размером (порядка 26 нм). В данной ситуации набор квантовых точек различных латераль-

ных размеров (аналогично случаю с градиентом ширины квантовых ям) также может привести к улучшению линейности и расширению динамического диапазона датчиков, однако в связи с технологическими проблемами (сложностью выращивания квантовых точек с непрерывно меняющимися размерами), вероятно, в такие датчики следует встраивать микропроцессор для линеаризации и калибровки выходного сигнала.

**И**зменение эффективной массы электронов при переходе от прямой к непрямой структуре энергетических зон под воздействием давления также может быть использовано в датчиках давления. Здесь, по-видимому, перспективными могут быть низкоразмерные структуры с модулированным легированием  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , в которых, в принципе, может обеспечиваться постоянное количество электронов в слое (решение проблемы DX-центров) в условиях  $\Gamma$ -X-резонанса. Использование сверхрешеток GaAs—AlAs с плавно меняющимся периодом решетки, кроме решения проблемы DX-центров, может, по нашим оценкам, существенно расширить рабочий диапазон измеряемых давлений и значительно улучшить линейность нагрузочной характеристики. Для создания хороших омических контактов к таким структурам можно рекомендовать напыление композиций Ni/Ge/Au/Ni/Au [10] с последующим отжигом при температуре 420°C в течение 30 с в атмосфере 4% водорода — 96% азота.

Резонансные туннельные структуры, как известно [9], весьма чувствительны к изменениям температуры и давления. Причем под действием давления могут существенно изменяться как частотные, так и вольт-амперные характеристики структур. Поэтому датчики давления на основе эффекта резонансного туннелирования представляются весьма перспективными в плане получения высокой чувствительности. Кроме того, в таких приборах можно получить непосредственный выход сигнала (токовый, частотный или в виде напряжения), причем здесь не требуется специальных электронных схем, необходимых в случае емкостных датчиков, для получения частотного выхода. Однако проблема высокой температурной чувствительности в резонансно-туннельных структурах, насколько нам известно, до сих пор так и не решена.

**П**олучение низкоразмерных структур, которые содержат от нескольких десятков до нескольких сотен слоев нанометровой толщины, стало возможным в связи с развитием МОС-гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако высокая стоимость технологического оборудования, специфические дефекты в структурах, полученных МЛЭ и МОС-гидридной технологией, требуют поиска новых альтернативных методик получения низкоразмерных структур. Наиболее перспективным для получения низкоразмерных гетероструктур, по нашему мнению, является метод *импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава* [11].

Выращивание низкоразмерных слоев при импульсном охлаждении раствора-расплава осуществлялось нами следующим образом.

Подложка при температуре  $T_1$  приводилась в контакт с насыщенным при этой температуре раствором-расплавом. Затем к тыльной стороне подложки подводился теплопоглотитель, температура которого  $T_2$  на величину  $\Delta T$  была меньше температуры подложки. Через некоторое время ( $\tau$ ) теплопоглотитель нагревался до температуры  $T_1$ , но в течение этого времени происходило охлаждение подложки и слоя раствора-расплава, находящегося вблизи лицевой поверхности подложки, что приводило к наращиванию эпитаксиального слоя. Толщина выращиваемого слоя зависела от температуры  $T_1$ , величины импульса холода  $\Delta T(t)$ , его длительности  $\tau$ , толщины теплопоглотителя, материалов растворителя и кристаллизующего вещества, материала и ориентации подложки и т. д.

Для выращивания этим методом квантовых точек InAs и закрывающих их слоев матричного материала GaAs использовался в качестве раствора-расплава индий (In), в который при выращивании GaAs добавляли, кроме растворимого вещества (GaAs), чистый галлий в количестве 5—10%. Температура процесса выращивания варьировалась в интервале 400—500°C. Температура теплопоглотителя выбиралась таким образом, чтобы переохлаждение на фронте кристаллизации не превышало 5—7°C и, тем самым, не происходило гомогенное зародышеобразование в объеме жидкой фазы. В качестве подложек использовались пластины GaAs с ориентацией поверхности (100), а также разориентированные на 4° от плоскости (100) в направлении (110).

На **рис. 5** изображены схематические разрезы полученных гетерокомпозиций. Кроме температуры выращивания, ориентации подложки и количества выращенных слоев, остальные параметры процесса выращивания (толщина теплопоглотителя,  $\Delta T$ ,  $\tau$ ) были одинаковыми.

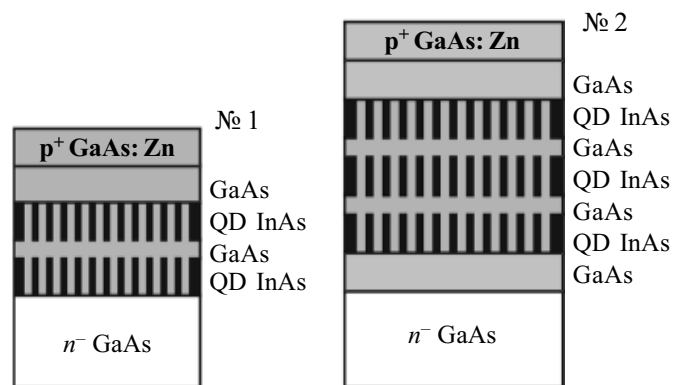


Рис. 5. Схема структур образцов, выращенных при 400°C (№ 1) и 500°C (№ 2)

Спектры фотолюминесценции полученных структур регистрировались на установке СДЛ-1 при 300 и 77 К и использовании дифракционной решетки 300 штр/мм. ФЛ возбуждалась гелий-неоновым лазером мощностью 20 мВт. В качестве фотоприемника использовали фотумножитель ФЭУ-62 со спектральной чувствительностью в длинноволновой области до 1200 нм.

Исследуемое излучение ФЛ выводилось как с поверхности образца, так и с торца. В последнем случае в качестве образцов использовались выколотые из полученных структур параллелепипеды с шириной 1—2 мм и

длиной 10—15 мм. Луч лазера направлялся на поверхность образца, а излучение ФЛ, выходящее с торца образца, фокусировалось на входную щель монохроматора установки СДЛ-1. Так как диаметр луча лазера был больше ширины образца, то, в зависимости от плотности падающего на образец излучения, через торец выходило либо свертлюминесцентное излучение, либо вынужденное излучение, генерированное в образце.

На спектрах ФЛ всех исследованных образцов наблюдались полосы излучения в интервале 1,05—1,35 эВ, которые обычно связываются с излучением островков или квантовых точек InAs в матрице GaAs.

На рис. 6 представлены типичные спектры ФЛ при 300 К, полученные с торца образца гетерокомпозиций в системе InAs—GaAs, выращенных при 400 и 500°С. Коротковолновые полосы при  $h\nu \geq 1,4$  эВ, по-видимому, связаны с излучением подложки GaAs, а длинноволновые — с излучением квантово-размерных островков (квантовых точек) InAs.



Рис. 6. Спектры ФЛ структур InAs—GaAs, выращенных при 400°С (1) и 500°С (2)

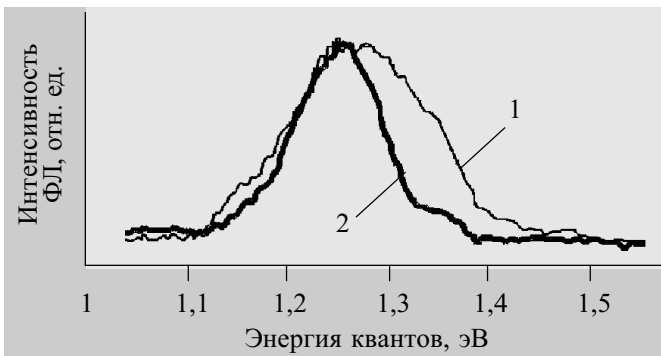


Рис. 7. Спектры ФЛ образцов при 77 К, выращенных при 400°С (1) и 500°С (2)

На рис. 7 показаны спектры ФЛ, измеренные при 77 К с торца тех же образцов, спектры которых были представлены на рис. 6. Интенсивность ФЛ при 77 К была в 10 раз выше, чем при 300 К. По сравнению со спектрами при 300 К, полосы излучения при 77 К сдвинуты в коротковолновую область, причем длинноволновое плечо для обоих образцов практически совпадает. Полоса излучения у образца № 1 шире, чем у образца № 2, за счет сдвига коротковолнового плеча в коротковолновую область спектра.

Наблюдаемое на рис. 6 смещение в длинноволновую область полосы излучения образца № 2 по сравнению с полосой образца № 1 может быть связано либо с различием температуры роста (различие размеров квантовых точек), либо с различием количе-

ства слоев с квантовыми точками. Как известно, с увеличением количества слоев квантовых точек спектры смещаются в длинноволновую область в связи с образованием системы вертикально связанных точек. Аналогичное явление наблюдается на рис. 6.

Совпадение длинноволновых плеч спектров ФЛ этих образцов при 77 К свидетельствует о том, что максимальные размеры квантовых точек у них одинаковы. Следовательно, сдвиг полосы излучения образца № 2 при 300 К в длинноволновую область по сравнению со спектром образца № 1 обусловлен тем, что в этом образце большее число слоев образует систему вертикально связанных точек.

Наблюдаемый на рис. 7 сдвиг коротковолнового плеча излучения образца № 1 в коротковолновую область свидетельствует о том, что в этом образце имеются квантовые точки с меньшим размером, чем в образце № 2. Образование точек меньшего размера в образце № 1 обусловлено тем, что в качестве подложки использовались пластины GaAs, разориентированные на 4° от плоскости (100) в направлении  $\langle 100 \rangle$ . Поверхность таких пластин содержит ступени с ориентациями поверхностей (100) и (111). Так как ширина ступеней с поверхностью, ориентированной в плоскости (111), существенно меньше ширины ступени с поверхностью (100), то на таких ступеньках образуются квантовые точки меньшего размера, чем на ступеньках с ориентацией поверхности (100) или на подложках, ориентированных в плоскости (100).

Проведенные нами исследования показывают, что размеры квантовых точек, выращенных методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава, существенно зависят от ориентации поверхности подложки. Более того, используя разориентированные подложки, можно получать наборы квантовых точек различных латеральных размеров в пределах одного слоя, что позволяет значительно расширить динамический диапазон датчиков давления и повысить их линейность.

\*\*\*

Таким образом, на основе имеющихся данных можно сделать следующие выводы.

Датчики на основе изменения спектральной зависимости фотолюминесценции под воздействием давления могут работать в очень широком диапазоне температур и давлений. Однако разрешающая способность таких датчиков очень низкая.

Значительно большей чувствительностью могут обладать датчики, базирующиеся на изменении интенсивности фотолюминесценции в области перехода от прямой к непрямой структуре зон, поскольку в этой области давлений интенсивность фотолюминесценции изменяется на порядки величины. Расширить динамический диапазон таких датчиков можно, если создать сверхрешетку из квантовых ям с градиентом ширины последних либо массив квантовых точек различных латеральных размеров. При этом Г—Х-резонанс в наиболее узкой яме или наименьшей квантовой точке будет иметь место уже в отсутствие давления, а в наибольшей — в области максимальных

давлений. Датчики первых двух групп явлений, возникающих в НС под воздействием одноосного или гидростатического давления, должны обеспечивать оптический доступ к структурам.

Наиболее чувствительными датчиками, несомненно, являются датчики давления на основе эффекта резонансного туннелирования. Однако их недостатком является сложность поддержания резонанса, высокая температурная чувствительность и узкий диапазон рабочих температур.

На основании проведенных нами исследований эпитаксиальных слоев с квантовыми точками, полученных методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава, можно также сделать вывод, что использование таких структур позволяет значительно улучшить основные характеристики датчиков давления.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП.— 1998.— Т. 32, № 1.— С. 3—18.
2. Li G. H., Han H. X., Ding K., Wang Z. P. Pressure behavior of photoluminescence from InAs submonolayer in GaAs matrix // J. Phys.: Condens. Matter.— 1998.— Vol. 10.— P. 11111—11120.
3. Perlin P., Trzeciakowski W., Litwin-Staszewska E. et al. The effect of pressure on the luminescence from GaAs/AlGaAs quantum wells // Semicond. Sci. Technol.— 1994.— Vol. 9.— P. 2239—2246.

4. Chen Y., Zhang W., Li G. H. et al. Pressure behavior of self-assembled  $\text{In}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  quantum dots with multi-modal distribution in size // J. Phys.: Condens. Matter.— 2000.— Vol. 12.— P. 3173—3180.

5. Takanabe K., Hitomi S., Yoshimura T. et al.  $\Gamma$ -X crossover in GaAs/AlAs short period superlattice under pressure // Semicond. Sci. Technol.— 1991.— Vol. 6.— P. 465—468.

6. Elabasy A. M. Effect of the  $\Gamma$ -X crossover on the binding energies of confined donors in single GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  quantum-well microstructures // J. Phys.: Condens. Matter.— 1994.— Vol. 6.— P. 10025—10030.

7. Jaros M., Brown L., Morrison I. Band structure effects in III-V superlattices under hydrostatic pressure as a means of determining microscopic signature of perfect and imperfect semiconductor interfaces // Semicond. Sci. Technol.— 1991.— Vol. 6.— P. 417—421.

8. Maude D. K., Foster T. J., Eaves L. et al. High pressure studies of resonant tunneling and superlattice phenomena // Ibid.— P. 422—427.

9. Кравченко А. Ф., Овсяк В. Н. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности.— Новосибирск: Изд-во Новосибирс. ун-та, 2000.

10. Taylor R. P. Physical and electrical investigation of ohmic contacts to AlGaAs/GaAs heterostructures // J. Appl. Phys.— 1994.— Vol. 76, N 12.— P. 7966—7972.

11. Марончук И. Е., Ерохин С. Ю., Кучерук А. Д. и др. Получение низкоразмерных структур в системе Al—Ga—As методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // Proceedings of 12th International symposium “Thin films in electronics”.— Kharkov.— 2001.— P. 377—381.

Д. ф.-м. н. Я. И. ЛЕПИХ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова  
E-mail: ndl\_lepikh@gmail.com.ua

Дата поступления в редакцию  
07.11 2002 г.

Оппонент к. т. н. А. Л. ПАВЛОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЭЛЕМЕНТ СЕНСОРОВ ГАЗА

*Приведены расчет и перспективное конструктивно-технологическое решение исполнения сенсора газа с встроенным электрическим тепловым элементом.*

Значительное число типов сенсоров газа (полупроводниковые, толстопленочные и др.) эффективно работают при температурах выше комнатной [1—4]. Повышение рабочей температуры, например, полупроводникового сенсора на основе  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}_3$  и др. до 300—400°C позволяет достичь максимальной чувствительности. Подогрев чувствительного элемента адсорбционного сенсора используется также для регенерации его свойств. Это вызывает необходимость создания в сенсорах тепловых элементов для нагрева и контроля температуры чувствительного слоя. Расчеты и конструированию теплового элемента газовых сенсоров и посвящена настоящая работа.

Наиболее эффективными представляются встроенные тепловые элементы, наносимые методами тон-

копленочной технологии на обратную сторону подложки, на которую с другой стороны тем или иным способом наносится чувствительный к газам слой материала. Базовая конструкция такого сенсора схематически показана на рис. 1.

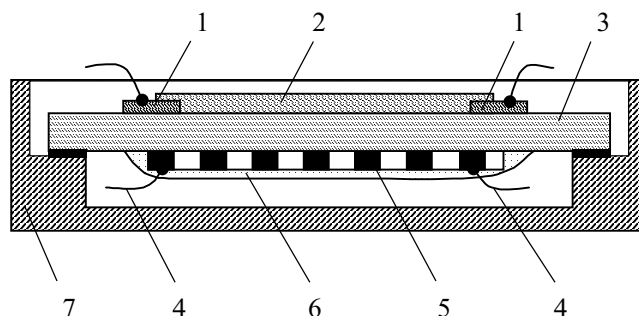


Рис. 1. Конструкция сенсора газа с встроенным тепловым элементом:

1 — контактные площадки; 2 — чувствительный слой; 3 — подложка; 4 — соединительные провода; 5 — нагревательный элемент; 6 — защитный слой; 7 — основание корпуса