

УДК 621.375.826:621.376.233

Д.С.Сизов (5 курс, каф. ФТТ), Н.Н.Леденцов, член-корр. РАН, проф.

## ДЛИННОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СТРУКТУРАХ С InGaAs/GaAs КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

В последнее время достигнут значительный прогресс в разработке полупроводниковых приборов с использованием самоорганизующихся квантовых точек (КТ) In(Ga)As/GaAs, получаемых методом самоорганизации в режиме эпитаксиального роста по механизму Странского-Крастанова [1]. Приборы с КТ в активной области обладают рядом преимуществ по сравнению с приборами на квантовых ямах (КЯ). Так, следствием  $\delta$ -образной плотности состояний в КТ является высокая температурная стабильность пороговой плотности тока лазеров. Эффективный захват неравновесных носителей в КТ уменьшает влияние безизлучательной рекомбинации (утечек). Малые времена захвата позволяют использовать лазеры на КТ на высоких рабочих частотах. Кроме того, использование InGaAs КТ позволяет расширить оптический диапазон приборов на основе GaAs и открывает возможность создания на их основе лазеров, излучающих на длине волны 1.3 мкм, которые являются основным компонентом линий оптоволоконной связи. Лазеры на подложках GaAs обладают большей температурной стабильностью, чем используемые в настоящее время лазеры на основе InP. Кроме того, при использовании структур на подложках GaAs возможность создания поверхностно излучающего лазера с использованием AlGaAs/GaAs Брэгговских отражателей.

Основной проблемой для реализации длинноволнового излучения в КТ является необходимость использования КТ достаточно больших размеров, что может привести к значительному увеличению плотности дислокационных дефектов вследствие накопления критически больших полей упругих напряжений [2]. Однако, был предложен ряд методов реализации бездефектных структур на основе КТ с длинноволновым излучением, таких как: использование сверхмалых скоростей роста, послойное осаждение In и As [3], выращивание КТ внутри InGaAs КЯ [4].

Нами был предложен метод получения структур излучающих на длине волны 1.3 мкм при заращивании InAs КТ слоем InGaAs. Образцы выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. На поверхности GaAs осаждался напряженный слой InAs, распадающийся на островки (режим роста Странского-Крастанова). Среднее количество осажденного материала InAs соответствовало 2-3 монослоям. Далее, слой КТ заращивался слоем твердого раствора InGaAs с содержанием In 10-20%, после чего структура заращивалась GaAs. По данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), заращивание КТ слоем InGaAs приводит к увеличению среднего размера КТ, что объясняется стимулированной миграцией атомов In из раствора к InAs островкам [5]. Вследствие релаксации упругих напряжений, период кристаллической решетки верхней части островков близок к периоду решетки InAs, и в процессе заращивания островкового слоя раствором InGaAs атомам In более выгодно встраиваться вблизи островков. Это приводит к образованию вокруг островков областей с большей концентрацией In, что ведет к увеличению эффективных размеров КТ. Фотолюминесцентные (ФЛ) исследования показали, что у образцов, в которых InAs островки заращивались слоем InGaAs, пик КТ располагается в областях с большими длинами волн, чем у структур с InAs/GaAs КТ. Этот эффект объясняется рядом причин. Во-первых, в КТ с большим эффективным размером энергетические уровни электронов и дырок располагаются более глубоко. Кроме того, InAs островки, заращенные InGaAs, характеризуются другими полями напряжений, чем островки, заращенные GaAs, так как период решетки InGaAs больше чем у GaAs. Перераспределение полей упругих напряжений также приводит к увеличению энергии

локализации. Кроме того на увеличение глубины энергетического уровня влияет тот факт, что выращенные InGaAs КТ располагаются в КЯ, образованной слоем InGaAs.

Все эти эффекты усиливаются с ростом толщины слоя InGaAs и концентрации In. Однако наращивание InAs островков слоем InGaAs большой толщины (больше 5 нм) и (или) с большой концентрацией In (больше 20 %) может привести к резкому увеличению количества дислокационных дефектов вследствие накопления чрезмерных полей упругих напряжений. Возникающие дислокации ухудшают оптические свойства структур. Атомы In в процессе роста мигрируют по направлению к дислокациям вследствие релаксации напряжений вокруг дислокаций. На изображениях ПЭМ видно, что при слишком больших толщинах и (или) концентрациях индия в слое InGaAs линейные размеры КТ уменьшаются. Это объясняется оттоком индия на дислокации. По данным фотолюминесценции у таких структур может наблюдаться коротковолновое смещение линии ФЛ и уменьшение интенсивности линии КТ. Таким образом, для получения максимальной длины волны без существенного снижения качества структуры необходимо подобрать оптимальные размеры начальных островков, толщину InGaAs слоя и концентрацию индия в нем. Установлено, что оптимальными параметрами являются: толщина InGaAs слоя 4-6 нм, концентрация In 12-15%, размеры начальных островков, соответствующие 2.5-2.7 монослоям InAs. Фотолюминесцентные исследования таких структур показали интенсивный пик в районе 1.3 мкм при комнатной температуре. Квантовый выход составил десятки процентов. Для получения максимального усиления в активной области лазеров было предложено растить несколько слоев КТ, разделяя их прослойками GaAs толщиной 300 ангстрем.

На основе таких структур были выращены лазеры, продемонстрировавшие высокую температурную стабильность пороговой плотности тока, дифференциальную эффективность около 55%, пороговую плотность тока  $60 \text{ А/см}^2$ , мощность излучения 2.7 ватт. Также, на основе подобных структур впервые в мире был получен поверхностно-излучающий лазер, излучающий на длине волны 1.3 микрона.

В результате работы показана возможность реализации длинноволнового излучения в области 1.3 мкм в структурах с InAs КТ, выращенными тонким слоем InGaAs. Найден диапазон параметров, позволяющий избежать деградации оптического качества структур с длинноволновым излучением. Такой подход позволил получить лазерные структуры на подложках GaAs, излучающие на длине волны 1.3 мкм, и характеризующиеся высокой температурной стабильностью пороговой плотности тока, высокой дифференциальной эффективностью и мощностью излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Леденцов Н.Н. и др. ФТП, 1998, том 32, выпуск 4.
2. Maximov M.V., et al, Journal of Electronic materials, vol. 29, No. 5, 2000.
3. Жуков А.Е. и др. ФТП, 1999, том 33, выпуск 2.
4. D. L. Huffaker and D. G. Deppe, Appl. Phys. Lett. **73**, 520 (1998).
5. Maximov M.V., et al, Phys. Rev. B (в публ.)