С.В. Иванов, В.Н. Жмерик

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26
тел: +7 (812) 292-79-99, факс: +7 (812) 297-10-17, эл. почта: ivan@beam.ioffe.ru

DOI 10.34077/RCSP2019-16

Доклад посвящен активно развивающейся фотонике среднего ультрафиолетового (УФ) диапазона длин волн ($\lambda=210\text{--}300\text{нм}$), использующей в качестве базовых материалов нитридные соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0\text{--}1$) с шириной запрещенной зоны от 3.4 до 6.1 эВ. УФ-фотодетекторы этого диапазона необходимы для развития солнечно-слепой фотосенсорики ($\lambda<290\text{нм}$), а источники спонтанного и лазерного УФ-излучения, найдут широкое применение в приборах оптической дезинфекции воды/воздуха/поверхностей ($\lambda=230\text{--}260\text{нм}$), в фототехнологиях, медицине, оптической спектроскопии, системах не прямой скрытой помехозащищенной связи и др. Плазменно-активированная МПЭ (ПА МПЭ) дает уникальные возможности эпитаксиального ступенчатого роста гетероструктур (Al,Ga)N в металл-обогащенных условиях при относительно низких температурах (до $\sim 700^\circ\text{C}$), что ограничивает развитие сегрегационных и диффузионных процессов в гетероструктурах. В сочетании со сверхбыстрым управлением ростовыми потоками ($<0.5\text{с}$) это позволяет формировать резкие интерфейсы между слоями, в том числе и монослойной толщины. Кроме того, ПА МПЭ позволяет выращивать в безводородной атмосфере слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с прецизионно контролируемым изменением состава, которые при их легировании Si(Mg) демонстрируют n -(p)-тип проводимости, усиленный поляризационными эффектами.

В докладе будут рассмотрены все основные стадии изготовления приборных гетероструктур на стандартных подложках c -сапфира с использованием нуклеационных и буферных слоев AlN, оптимизация роста которых позволила достичь практически нулевых средних упругих напряжений в 2-мкм буферных слоях и снизить в них плотности винтовых и краевых прорастающих дислокаций до $\sim 4 \cdot 10^8$ и $\sim 3 \cdot 10^9 \text{см}^{-2}$, соответственно. Затем будут обсуждены оптимальные режимы импульсных методов роста, включающих эпитаксию с повышенной миграцией адатомов, металл- и температурно-модулированные эпитаксии, которые позволили получить атомарно-гладкие барьерные слои AlN и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с однородным составом и контролируемой поверхностной концентрацией атомов III группы [1]. Основное внимание будет посвящено методам формирования и свойствам одиночных и множественных квантовых ям (КЯ) на основе монослойных и субмонослойных вставок GaN в барьерные слои $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ или AlN. Будут представлены результаты исследований таких КЯ с номинальной толщиной $d_{\text{QW}}=0.5\text{--}7$ монослоев (МС) с помощью атомарно-силовой и сканирующей просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгенодифракционного анализа. Будет рассмотрено и объяснено необычное поведение упругих напряжений во время роста множественных КЯ GaN/AlN с $d_{\text{QW}}<2\text{МС}$, при котором среднее напряжение в гетероструктуре остается нулевым несмотря на неизменную латеральную постоянную решетки AlN. Будут представлены результаты исследований оптических свойств слоев и гетероструктур с КЯ с помощью измерений спектров фото-, электро- и катодолуминесценции. Будет продемонстрирована не только их оптическая активность в диапазоне среднего УФ излучения 235–300 нм при оптической, инжекционной и электронной накачках, но и резкое увеличение эффективности излучательной рекомбинации в суб-250 нм УФ диапазоне при уменьшении толщины КЯ в GaN/AlN гетероструктурах до $d_{\text{QW}}=1.5\text{МС}$ [2]. Структуры с такими множественными КЯ (до 360) продемонстрировали при электронной накачке спонтанное излучение с $\lambda=235\text{--}240\text{нм}$ и импульсной выходной мощностью до $\sim 1\text{Вт}$. Кроме того, будут представлены результаты возбуждения в различных слоях и наногетероструктурах стимулированного излучения в диапазоне $\lambda=258\text{--}300\text{нм}$ с минимальной пороговой плотностью оптической мощности $\sim 150\text{кВт/см}^2$ ($\lambda=290\text{нм}$). И, наконец, будут представлены различные типы солнечно-слепых УФ-фотодетекторов на основе p - i - n фотодиодов, диодов Шоттки и фотокатодов с отрицательным электронным сродством, продемонстрировавших фоточувствительность до 34мА/см^2 в диапазоне $\lambda=226\text{--}280\text{нм}$.

Работа осуществляется при частичной поддержке РФФИ-БРИКС (#17-52-80089) и РНФ (#19-72-30040).

Литература

- [1] Jmerik V.N., Nechaev D.V., Ivanov S.V. Molecular Beam Epitaxy (MBE): From Research to Mass Production, 2nd Edition, ed. by M.Henini, Elsevier, 2018.
- [2] Jmerik V.N. et al. Appl. Phys. Express 11, 091003 (2018).