2D экситоны в одиночных монослоях GaN в AlN

Торопов А.А.¹, Европейцев Е.А.¹, Нестоклон М.О.¹, Смирнов Д.С.¹, Кайбышев В.Х.¹,
Будкин Г.В.¹, Жмерик В.Н.¹, Нечаев Д.В.¹, Рувимов С.², Шубина Т.В.¹, Иванов С.В.²,
Жиль Б.³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия

² Университет Нотр-Дам, Индиана 46556, США

³ Университет Монпелье 2, 34095, Франция

DOI 10.34077/Semicond2019-201

В полупроводниковых 2D структурах с экстремально сильным квантовым ограничением носителей заряда многократное увеличение энергии связи и силы осциллятора экситона приводит к доминированию экситонных эффектов вплоть до комнатной температуры. При низкой температуре большая скорость экситонных переходов обуславливает превалирование излучательных каналов рекомбинации по сравнению с безызлучательными, увеличивая квантовый выход излучения. Однако скорость радиационного затухания экситонов определяется усреднением по термическому распределению и, вследствие этого, прямо пропорциональна температуре и радиационному времени жизни (τ_0) экситона при нулевом волновом векторе и обратно пропорциональна ширине (E_0) “излучательного окна” в k -пространстве, включающего экситонные состояния внутри светового конуса. Для известных 2D структур – гетероструктур с узкими полупроводниковыми квантовыми ямами (КЯ) и монослоев дихалькогенидов переходных металлов – τ_0 находится в диапазоне нескольких пикосекунд. Тем не менее, при 300 К достаточно малая величина E_0 (10-70 мкэВ) приводит к длинным временам жизни экситона (вплоть до десятков наносекунд) и доминированию безызлучательной рекомбинации.

В настоящей работе представлен новый подход к реализации 2D структур с предельно сильным экситонным ограничением, основанный на использовании монослойных (МС) пироэлектрических КЯ GaN/AlN. Гетероструктуры такого типа изготавливаются методом молекулярно-пучковой эпитаксии и являются основой для разработки оптоэлектронных приборов “проблемного” спектрального диапазона среднего УФ [1-3]. Возможность ограничения носителей заряда в одиночных МС GaN определяется гигантским разрывом зон (более 1 эВ) на интерфейсе GaN/AlN, а также экстремально большими эффективными массами электронов и дырок, составляющих экситон. Экспериментально (методами время-разрешенной оптической спектроскопии) и теоретически (в рамках теории функционала плотности и теоретико-группового анализа) показано, что квантовое ограничение носителей заряда проявляется в увеличении эффективности экситонного излучения при уменьшении толщины слоя GaN вплоть до ~2-3 МС. Большая ширина запрещенной зоны (~5.3 эВ) и, как следствие, большая ширина излучательного окна ($E_0 \sim 300$ мкэВ) приводят к рекордно малому радиационному времени жизни экситона ~3 нс при 300 К. Однако, формирование предельно узкой КЯ с толщиной 1 МС приводит к резкому росту времени жизни экситонной фотолуминесценции и падению квантового выхода излучения вследствие увеличения расщепления между уровнем основного дипольно-запрещенного (темного) экситонного состояния и расположенными выше по энергии уровнями оптически-активных (светлых) экситонов. Величина расщепления определяется ростом короткодействующей части электрон-дырочного обменного взаимодействия в условиях предельно сильного квантового ограничения и для одно-МС КЯ превышает $k_B T$ при комнатной температуре. Проведенные исследования позволили определить структуру экситонных состояний в GaN/AlN атомарно-тонких КЯ и оптимизировать конструкцию светоизлучающих приборов на их основе.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (Грант № 19-52-12057).

[1] V. N. Jmerik, D. V. Nechaev, A. A. Toropov, et al., *Appl. Phys. Express* 11, 091003 (2018).

[2] X. Rong, X. Wang, S. V. Ivanov, et al, *Adv. Mater.* 28, 7978 (2016).

[3] S. M. Islam, K. Lee, J. Verma, et al., *Appl. Phys. Lett.* 110, 041108 (2017).