

ЭФФЕКТ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ПАМЯТИ В КРАЕВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВОБОДНЫХ ОБРАЗЦОВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

М.Е.Компан (kompan@solid.ioffe.rssi.ru) (1), И.Ю.Шабанов(1),
Е.Е.Заварин (1), Г.Д.Яковлев (1), Н.Heleva (2), Ю.В.Жиляев(1)

(1) Физико-Технический Институт им.А.Ф.Иоффе РАН.

(2) AXT corporation 4911 Solar way, Freemont, CA 94538

Нитрид галлия – перспективный полупроводниковый материал, с технологическим освоением которого связываются ожидания нового поколения приборов для высокотемпературной и силовой высокочастотной электроники, и продвижение полупроводниковой оптоэлектроники в коротковолновую часть видимого и ближний ультрафиолетовый диапазоны спектра [1,2]. Однако, несмотря на интенсивные исследования, проводимые во всем мире, уровень технологического освоения и понимания свойств этого материала недостаточен. Одним из факторов, сдерживающих появление материалов с необходимой степенью совершенства, является отсутствие технологии получения объемного материала для последующего применения разработанного арсенала гомоэпитаксиальных технологий. Получение толстых слоев GaN с последующим отделением от подложки (free-standing или FS-GaN) нацелено на прогресс в этом направлении. В соответствии с этим особый интерес представляет изучение свойств этого нового типа материалов.

Образцы для исследования получались хлоридной эпитаксией при температуре ~ 900 °С, с использованием аммиака в качестве источника азота, на кремниевых и сапфировых подложках. Более совершенные образцы с меньшей плотностью дислокаций $\sim 10^7$ см⁻² были получены с использованием технологии латерального зарастания (lateral overgrowth). Отделенные от подложки образцы представляли собой плоские пластины толщиной 0,4-0,5 мм. Отклонения гексагональной оси материала от нормали к плоскости образцов составляли порядка 20 – 25 угловых минут. При неполяризованной регистрации образцы демонстрировали типичные для данного материала параметры краевой люминесценции – положение максимума полосы 3,47(3,22)eV и полуширину FWHM 25(50)meV при 78(300)K.

В эксперименте исследовалась краевая люминесценция и ее поляризация при поляризованном фотовозбуждении. Чтобы избежать тривиальных эффектов зависимости люминесценции от поляризации возбуждения в кристалле с анизотропией, исследовались образцы с нормальной ориентацией гексагональной оси к поверхности кристалла.

Для возбуждения люминесценции использовался импульсный лазер на молекулярном азоте с длиной волны 337 нм (3,69 eV) и длительностью

импульса 6 нсек. Опыты ставились при температурах 78 и 300K. Регистрация сигнала люминесценции осуществлялась устройством типа box-car с временным разрешением порядка 10^{-8} секунды; тем самым для нитрида галлия с его субнаносекундным масштабом рекомбинационных процессов условия эксперимента соответствовали стационарным условиям возбуждения и регистрации.

Исследование зависимостей характеристик люминесценции от поляризации возбуждения являлось частью программы по поиску и исследованию спин-зависимых оптических явлений в нитриде галлия. До настоящего времени о наблюдении эффектов этого плана не сообщалось. В то же время в более традиционных материалах типа AlGaAs, например, в кристаллах на основе GaAs, подобные исследования составили целое направление, обеспечившее получение уникальной информации о свойствах материала и эффективные применения [3].

В ходе исследований было обнаружено, что форма полосы краевой люминесценции при температуре 78K зависит от поляризации возбуждающего света и положения анализатора в канале детектирования. При скрещенных линейных поляризаторе и анализаторе (в каналах возбуждения и детектирования) полоса имела негауссову форму с выделяющимся широким основанием (около 30 meV по уровню 0,1 от максимума). Изменение взаимной ориентации поляризатора и анализатора на параллельную приводило к резкому изменению формы полосы. Коротковолновой край резко сжимался с исчезновением широкого основания (до 3 – 5 meV по уровню 0,1). В некоторых случаях наблюдалось также заметное сужение коротковолнового края полосы и по уровню 0,5. При этом сужение коротковолнового края сопровождалось некоторым увеличением интенсивности полосы в максимуме. В то же время форма и интенсивность длинноволнового края полосы люминесценции строго оставались неизменными.

Нам не известны ни подобные эффекты в других материалах, ни какие-либо публикации по эффектам памяти к поляризации возбуждения в нитриде галлия.

Рассмотрим механизмы, которые могли бы быть ответственными за наблюдаемый эффект. Для дальнейшего необходимо отметить, что различная форма полосы люминесценции в различных поляризациях автоматически означает частичную линейную поляризацию этой полосы, различную для различных ее спектральных компонент.

Представляется маловероятным, что эффект родственен эффектам типа оптической ориентации или выстраивания [3,4]. Согласно существующим представлениям, линейная поляризация люминесценции может возникать при рекомбинации носителей с величиной полного углового момента $\hbar/2\pi$ и более. Поскольку нитрид галлия имеет простую зону проводимости со спином $\frac{1}{2}$, возникновение линейной поляризации люминесценции может быть связано только с поляризацией дырок. Однако учитывая, что возбуждение осуществляется примерно на 250 meV выше по энергии, чем положение

полосы, и крайне высокую эффективность релаксации момента дырок в актах рассеяния, очень маловероятно, что дырки могут сохранить «память» о первоначальном направлении момента от момента рождения электронно-дырочной пары светом до момента рекомбинации.

Ключ к объяснению природы эффекта можно найти в спектральных характеристиках люминесценции. Обнаруженный эффект состоит в изменении (при изменении взаимной ориентации поляризации света возбуждения и детектирования) негауссовых крыльев полосы – т.е. в изменении контура неоднородного уширения. Уменьшение крыла полосы наблюдается только для коротковолнового края, при этом возрастает интенсивность в максимуме, т.е. – у основной компоненты полосы. С учетом физического смысла понятия неоднородного уширения это можно интерпретировать так, что возбуждения из некоторых областей, ширина запрещенной зоны в которых выше, чем E_g для основного материала, могут мигрировать в области, для которых E_g соответствует основной массе материала.

Заметим, что вышеприведенная трактовка не потребовала никаких дополнительных модельных предположений; однако формулировка эффекта в указанной форме автоматически объясняет наиболее характерные факты, наблюдающихся в эксперименте. Уменьшение интенсивности высокоэнергетического крыла, увеличение интенсивности в максимуме соответствует миграции возбуждений по направлению уменьшения E_g , а сохранение формы и интенсивности низкоэнергетического крыла означает, что из областей с E_g меньше, чем у основного материала, возбуждения не мигрируют в области основного материала.

Остается необходимым выяснить, каким образом поляризация возбуждения связана с этим процессом. С учетом того, что структура дефектных областей абсолютно неизвестна, детальная интерпретация этого факта невозможна. Однако на качественном уровне понимание может быть получено из общих соображений. Далее мы будем предполагать, что все компоненты краевой люминесценции соответствуют одному и тому же типу перехода; различие в положениях компонент обусловлено некоторой неоднородностью материала, в частности, вследствие неоднородной деформации.

Для полосы краевой люминесценции и возбуждение и рекомбинация связаны с переходами валентная зона – зона проводимости, при этом правила отбора при оптических переходах одинаковы для поглощения и излучения. Из общих термодинамических принципов следует, что, тем самым, и поляризация люминесценции должна совпадать с поляризацией возбуждения. (Отметим еще раз – мы предполагаем не память о начальном направлении момента дырки, но соотношение между правилами отбора для поглощения и излучения в локальных областях, которые могут характеризоваться дополнительной анизотропией.) Примерно такое же соотношение должно выполняться для слабodefekтных областей. При этом области с большей дефектностью с большей вероятностью будут иметь и большие отличия параметров (и, в

частности, анизотропию) от параметров основной массы. Это является основанием для модельного предположения – мы будем считать, что чем больше дефектность, тем больше будет и отклонение уровней энергии и правил отбора пополяризации от тех, которые характерны для основной массы материала.

Можно также предположить, что миграция из более дефектных областей в основной материал более затруднена, чем из областей со слабой дефектностью. Такое предположение основывается на известных тенденциях – в дефектной области следует ожидать меньшей подвижности; кроме того, можно ожидать, в особенности для случая, когда дефектность вызвана случайной деформацией, что более сильное сжатие захватывает и большие пространственные области. Эти предположения позволяют понять, почему миграция возбуждений из высокоэнергетического крыла более эффективна при параллельной ориентации линейной поляризации возбуждения и регистрируемой люминесценции, и менее эффективна, если линейная поляризация возбуждающего света перпендикулярна.

В целом представляется, что эффект обусловлен следующей цепочкой причин: материал не вполне однороден; центральная полоса соответствует рекомбинации в основной массе относительно совершенного материала. Области с малой дефектностью характеризуются, во-первых, слабым отклонением параметров – величины E_g , величины и направления случайной анизотропии от основной массы материала. Во-вторых, эти области допускают миграцию возбуждений в основной материал (естественно, в сторону уменьшения E_g). Это обуславливает уменьшение высокоэнергетического крыла полосы люминесценции при регистрации с параллельными анализатором и поляризатором. Напротив, области с относительно большей дефектностью имеют более сильные локальные анизотропии и другие правила отбора, и, кроме того, миграция из таких областей затруднена.

Фактически, в такой интерпретации эксперимент представляет собой новую разновидность т.н. «site-selected» люминесцентной спектроскопии по выявлению дефектных областей и может быть использован для изучения материалов с локальными неоднородностями.

[1] H.Morcos, S.Strite, G.B.Gao, M.E.Lin, B.Sverdlov, M.Burns // J.Appl.Phys. v.76, p.1363, (1994)

[2] S.Nakamura et.al. // Appl.Phys.Lett. v.72, p.1939, (1998)

[3] «Опическая ориентация» сб. под ред. Б.П.Захарчени и Ф.Майера, // «Наука», Лен-д, 1989, 408 стр.

[4] Захарченя Б.П., Мирлин Д.Н., Перель В.И., И.И.Решина // УФН т.136, в.3, с.459, (1982)