

Влияние электрического поля и высокой плотности возбуждения на люминесценцию эпитаксиальных пленок GaN

© М.А. Якобсон, Д.К. Нельсон, Е.В. Калинина

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Исследовано влияние поля барьера Шоттки и высокой плотности возбуждения на спектры рекомбинационного излучения эпитаксиальных пленок GaN, выращенных MOCVD методом. Обнаружено, что при обратном смещении происходит гашение люминесценции, а при прямом — ее возгорание. Наблюдаемый эффект объясняется вариацией толщины слоя объемного заряда под действием приложенного напряжения. В условиях высокой плотности возбуждения наблюдалось возгорание новой полосы, обусловленной процессом экситон-экситонных столкновений.

В последнее время исследованию нитридов элементов III-й группы уделяется в мире повышенное внимание. Это обусловлено перспективностью данных широкозонных полупроводниковых материалов для создания лазерных структур, работающих в синей и ультрафиолетовой областях спектра. В данной работе исследовалась низкотемпературная ($T = 6-80$ K) фотолюминесценция пленок GaN, выращенных методом MOCVD на подложках 6H-SiC и Al_2O_3 . Было исследовано влияние поля барьера Шоттки на люминесценцию GaN. Также была исследована фотолюминесценция пленок GaN в условиях высокой плотности возбуждения. Возбуждение люминесценции в этом случае производилось импульсным азотным лазером ($\lambda = 337.1$ nm). Плотность возбуждения варьировалась от 10 до 1000 kW/cm².

При $T = 6$ K в спектре фотолюминесценции GaN в области экситонного резонанса $A_{n=1}$ доминирует интенсивная линия резонанса связанного на нейтральном доноре ($h\nu = 3.468$ eV) [1]. При $T = 80$ K в спектральной области ниже экситонного резонанса ($h\nu = 2.80-3.30$ eV) отчетливо наблюдается серия линий, обусловленная донорно-акцепторной рекомбинацией. Мы изучали поведение этих линий при приложении внешнего электрического напряжения к барьеру Шоттки. Зависимости интенсивности линии связанного экситона от величины приложенного напряжения для трех образцов GaN, а также зависимость интенсивности линии донорно-акцепторной рекомбинации для образца #3 приведены на рис. 1. В целом, влияние электрического поля на интенсивность люминесценции состоит в следующем. При прямом смещении интенсивность сначала возрастает, затем наблюдается насыщение. При обратном смещении наблюдается гашение люминесценции. В то же время, для различных образцов влияние приложенного напряжения на интенсивность люминесценции несколько отличалось. Так, для образца #1 наблюдалось только гашение люминесценции; возрастание интенсивности при прямом смещении отсутствовало. Для образца #2 наблюдалось как гашение при обратном смещении, так и возгорание, а затем насыщение при прямом. Для образца #3 наблюдалось возгорание линии связанного экситона при прямом смещении, гашение же при обратном смещении также наблюдалось, но было весьма

слабым. Для линии донорно-акцепторной рекомбинации наблюдалось сильное гашение и относительно слабое возгорание.

Наблюдавшийся эффект хорошо описывается в рамках модели [2], в соответствии с которой люминесценция возбуждается только за пределами области объемного заряда W , а ее интенсивность определяется поглощением возбуждающего света, падающим экспоненциально в глубину образца. При этом вблизи поверхности образца, в области сильного неоднородного электрического поля, концентрация экситонов (или носителей) мала. Относительная интенсивность люминесценции описывается

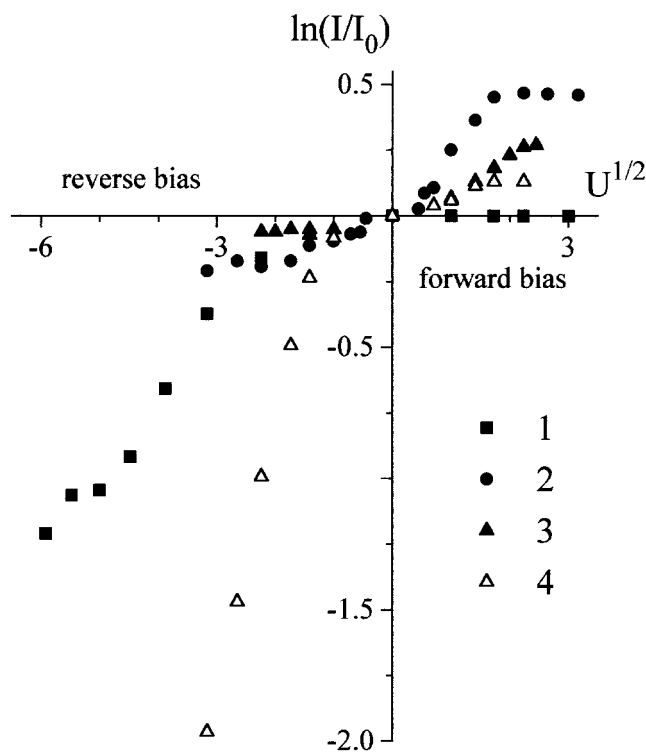


Рис. 1. Зависимости относительной интенсивности линий люминесценции GaN от приложенного напряжения. 1–3 — линия связанного экситона для образцов #1, #2, #3, соответственно ($T = 6$ K), 4 — линия донорно-акцепторной рекомбинации для образца #3 ($T = 80$ K).

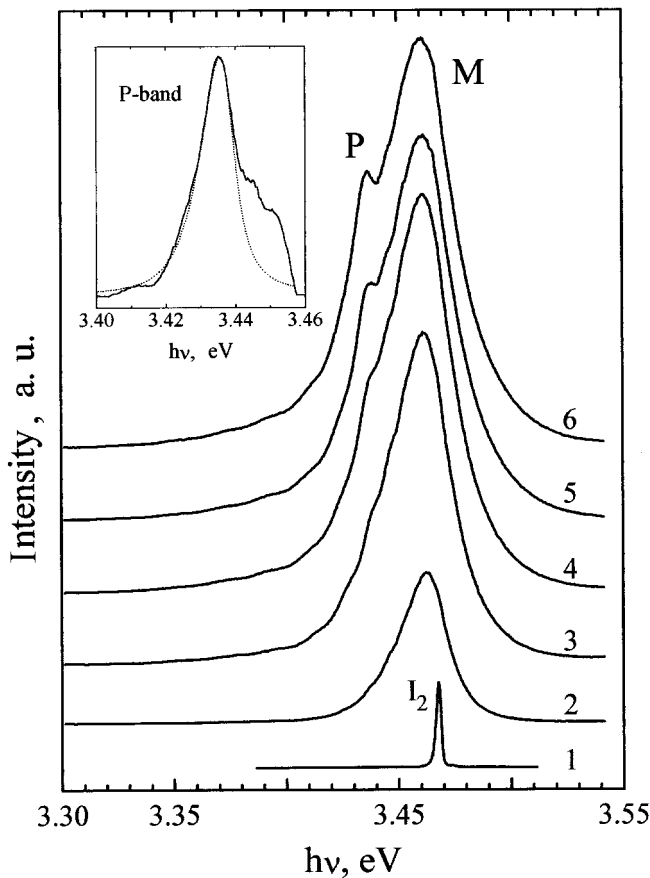


Рис. 2. Спектры люминесценции GaN при различной интенсивности возбуждения. $T = 6$ К. Возбуждение: 1 — ртутная лампа, 2 — 200 kW/cm^2 , 3 — 500 kW/cm^2 , 4 — 900 kW/cm^2 , 6 — 1000 kW/cm^2 . На вставке — анализ формы Р-полосы. Сплошная линия — эксперимент, пунктирная — расчет.

выражением:

$$I/I_0 = \exp[-\alpha(\lambda_{\text{exc}})W],$$

где I , I_0 — интенсивность люминесценции при наличии и в отсутствие напряжения U , $\alpha(\lambda_{\text{exc}})$ — коэффициент поглощения на длине волны возбуждающего света. Изменение W при изменении U приводит к соответствующему изменению интенсивности люминесценции. Учитывая, что $W \sim U^{1/2}$, имеем:

$$\ln(I/I_0) \sim U^{1/2}.$$

Выход на насыщение при прямом смещении можно связать с выпрямлением зон. Различие в поведении разных образцов связано, как мы считаем, с различием в их свойствах, таких как толщина области объемного заряда, концентрация электрически активных примесей и т. п.

На рис. 2 приведены спектры люминесценции GaN, полученные при различной плотности возбуждения. При слабом возбуждении в спектре наблюдается линия связанного экситона I_2 . При повышении плотности возбуждения эта линия трансформируется в широкую полосу М. При дальнейшем увеличении возбуждения на

длинноволновом крыле М-полосы возникает новая полоса Р. Интенсивность Р-полосы растет сверхлинейно с увеличением плотности возбуждения.

Природа М-полосы, по-видимому, достаточно сложная, за нее ответственны несколько процессов. В данной работе мы будем обсуждать только Р-полосу. Два процесса могут быть ответственны за возникновение Р-полосы: неупругие столкновения свободных экситонов и излучательный распад экситонной молекулы. В обоих случаях форма Р-полосы должна быть обратной максвелловской и описываться выражением:

$$I(h\nu) = \int_0^{\infty} \sqrt{E} \exp(-E/kT_{\text{exc}}) \frac{\Gamma}{[E - (h\nu_0 - h\nu)]^2 + \Gamma^2} dE,$$

где Γ — полное затухание начального и конечного состояний, T_{exc} — температура экситонного газа. На вставке рис. 2 приведен результат анализа формы Р-полосы. Наилучшее согласие расчетной кривой с экспериментальной получено при следующих значениях параметров: $T_{\text{exc}} = 40$ К, $\Gamma = 3.5 \text{ meV}$ и $h\nu_0 = 3.439 \text{ eV}$. Как видно, температура экситонного газа оказывается существенно выше температуры ванны. Такой перегрев может быть обусловлен, во-первых, избыточной энергией возбуждающего кванта, и, кроме того, оже-процессами, которые в кристаллах с большой концентрацией доноров могут быть весьма эффективными [3]. Исследования температурной зависимости спектров люминесценции показали, что в диапазоне температур от 6 до 60 К никакого изменения в спектре не происходит. Поэтому Р-полоса не может быть обусловлена аннигиляцией биэкситона, вследствие его малой энергии связи. Таким образом, учитывая всю совокупность упомянутых свойств Р-полосы, мы можем заключить, что она обусловлена неупругими экситон-экситонными соударениями. В процессе соударения один экситон излучательно аннигилирует, а второй переходит в возбужденное состояние.

Список литературы

- [1] Д.К. Нельсон, Ю.В. Мельник, А.В. Селькин, М.А. Якобсон, В.А. Дмитриев, К.Ж. Ирвин, К.Х. Картер, Мл. ФТТ **38**, 3, 822 (1996).
- [2] R.E. Hetrick, K.F. Yeung. J. Appl. Phys. **42**, 2882 (1971).
- [3] Г.В. Михайлов, Д.К. Нельсон, Б.С. Разбирин, В.А. Харченко. ФТТ **31**, 11, 160 (1989).