

06;07;12

Повышение эффективности *i-n*-GaN-светодиодов с помощью электрохимического травления

© В.Г. Сидоров, А.Г. Дрижук, М.Д. Шагалов,
Д.В. Сидоров, А.С. Усиков

Вологодский политехнический институт

Поступило в Редакцию 2 июля 1998 г.

Исследовано электрохимическое травление *i-n*-GaN-светодиодных структур в водных растворах КОН и NaOH с целью удаления паразитных низкоомных слоев и включений в структурах, которые шунтируют активные каналы протекания тока через структуры и снижают интенсивность электролюминесценции. Интенсивность электролюминесценции структур в процессе травления при этом возрастает на 2–3 порядка.

Травление полупроводниковых материалов и приборных структур применяется на всех стадиях изготовления полупроводниковых приборов. При этом одной из важнейших операций является так называемое послетравление (post etching), т.е. травление уже готовых приборных структур перед нанесением на них защитных покрытий или перед герметизацией. Цель этой операции состоит в очистке поверхности структуры от загрязнений, снижении и стабилизации скорости поверхностной рекомбинации, что приводит к уменьшению токов утечки и увеличению эффективности и стабильности работы создаваемых приборов. В качестве травителей для полупроводниковых материалов чаще всего используются водные растворы кислот, щелочей или солей. А в качестве методов — химическое или электрохимическое травление.

Нитрид галлия, в отличие от многих других полупроводников, обладает чрезвычайно высокой химической стойкостью. Он практически не растворяется ни в кислотах, ни в щелочах даже при высоких температурах. GaN травится лишь в расплавах щелочей и некоторых солей [1]. Но такое травление разрушает любое маскирующее покрытие, а также подложку и не годится в работе со слоями и структурами GaN. Для GaN пока нет хороших водных травителей, работающих

при комнатной температуре. Поэтому для создания в структурах на основе GaN необходимого геометрического рельефа при изготовлении приборов в основном используются методы сухого травления [2].

Поиск возможностей обработки кристаллов GaN в водных травителях в настоящее время интенсивно продолжается [3–10]. И, пожалуй, единственным способом, обеспечивающим достаточно быстрое растворение GaN при комнатной температуре, пока остается электрохимическое травление в разбавленных щелочах [1,7,8]. Фотохимическое травление GaN проводится также в разбавленных щелочах и при комнатной температуре, но при интенсивной подсветке собственным светом [3,6]. Этот способ травления по механизму растворения GaN в общем-то аналогичен электрохимическому. Отличие состоит лишь в том, что свободные носители заряда, участвующие в процессе травления, доставляются к поверхности образца, подвергающейся травлению, не электрическим полем, а создаются вблизи поверхности собственным светом. Фотоэлектрохимическое травление [9] совмещает оба процесса.

При электрохимическом травлении растворение GaN идет избирательно с максимальной скоростью в местах протекания наибольших токов, т.е. в областях кристалла с наибольшей дефектностью и проводимостью. В связи с этим электрохимическое травление может быть использовано для выявления электрических и структурных неоднородностей в эпитаксиальных слоях и структурах GaN. Более того, данный способ травления может быть применен для повышения эффективности электролюминесценции *i-n*-GaN-светодиодных структур. Этому вопросу и посвящено данное краткое сообщение.

Излучающаяся *M-i-n*-GaN-структура относится к структурам типа металл–диэлектрик–полупроводник. Диэлектрическая область структуры выполнена в виде полуизолирующего *i*-слоя из сильно компенсированного GaN. Причем компенсирующая примесь выбирается так, чтобы одновременно она была и эффективным излучательным центром.

Электролюминесценция (ЭЛ) *i-n*-структуры возбуждается в *i*-слое. Механизм возбуждения ЭЛ связан с ускорением основных и неравновесных носителей заряда в сильном электрическом поле *i*-слоя до энергий, достаточных для ионизации или ударного возбуждения центров люминесценции. Неравновесные носители заряда возникают в *i*-слое за счет туннельной или ударной ионизации примесей или атомов кристалла GaN. В этом случае самый простой способ повышения эффективности ЭЛ состоит в увеличении концентрации "горячих" носителей заряда

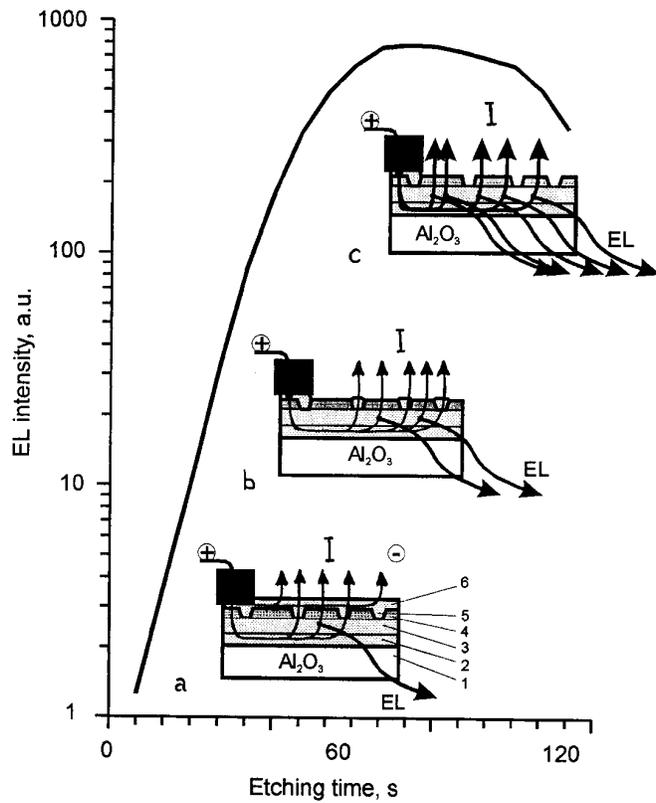
путем повышения напряженности электрического поля в i -слое. Но этому препятствует принципиальная неоднородность эпитаксиальных слоев GaN.

Для эпитаксиальных слоев GaN характерен рост в виде плотно сросшихся однонаправленных блоков. В соответствии с блочностью кристалла неоднородно распределяются как по поверхности, так и по толщине слоя и примеси, и структурные дефекты. Распределение этих неоднородностей четко коррелирует с распределением по образцу как спектральных характеристик, так и интенсивности люминесценции [7]. Неоднородность легирования i -слоя приводит к возникновению в нем во время роста низкоомных микровключений, в том числе и сквозных проводящих каналов. Эти включения шунтируют i -слой, снижая эффективность ЭЛ. Очевидно, что эффективность ЭЛ должна возрасти, если проводящие включения в i -слое каким-либо образом удалить.

Излучающие $i-n$ -GaN-структуры, ориентированные в плоскости (11–20), были выращены газофазовым методом в хлоридно-гидридной системе на сапфировых подложках (10–12). Сначала при 1050°C выращивался слой низкоомного нелегированного n -GaN. Затем при 950°C выращивалась высокоомная i -область, состоящая из двух слоев с целью пространственного разделения области сильного поля и области генерации ЭЛ. Внутренний слой i -области легировался цинком и кислородом одновременно. Поверхностный слой был более высокоомным, чем слой GaN(Zn,O), и был легирован только цинком. Голубая ЭЛ с максимумом при 2.55 eV возбуждалась в i -GaN(Zn,O)-слое. Причем из-за асимметрии структуры ЭЛ возбуждалась только при отрицательной полярности напряжения на контакте к слою i -GaN(Zn) [11].

Особенности условий выращивания $i-n$ -GaN-структур приводили к тому, что в заключительной стадии процесса на поверхности i -слоя всегда вырастал тонкий ($\sim 0.1 \mu\text{m}$) хорошо проводящий слой n -GaN(Zn). То есть все выращенные таким способом структуры фактически были структурами $n-i-n$ -типа. Поверхностный проводящий n -GaN(Zn)-слой и низкоомные включения в i -слое, о которых говорилось выше, увеличивают токи растекания и токи утечки в структурах, шунтируют i -слой и снижают эффективность ЭЛ. При этом ЭЛ удастся возбудить только в импульсном режиме. На постоянном токе тепловой пробой структуры обычно наступает раньше, чем достигается порог зажигания ЭЛ.

Электрохимическое травление $i-n$ -GaN-структур проводилось в (0.1–0.2)N водном растворе KOH или NaOH при 300 K и плотности тока



Зависимость интенсивности голубой электролюминесценции i - n -GaN-структуры от времени травления. На вставках a , b , c — структура на различных стадиях травления: 1 — сапфировая подложка, 2 — слой проводящего n -GaN, 3 — активный i -GaN(Zn,O)-слой, 4 — высокоомный i -GaN(Zn)-слой, 5 — низкоомные включения n -GaN(Zn) в i -GaN(Zn)-слое, 6 — низкоомный слой n -GaN(Zn); здесь же даны линии тока (I) через структуру и схематически, также линиями (EL), представлен поток электролюминесценции.

(0.05 – 0.1) A/cm^2 . Положительный потенциал подводился к контакту на поверхности структуры, защищенному химически стойким лаком, отрицательный к электролиту. Величина напряжения на структуре выбиралась с учетом порога зажигания ЭЛ, определяемого при импульсном

возбуждении, и оставалась постоянной в процессе травления структуры. Образующаяся при травлении на поверхности GaN гидроокись галлия блокирует дальнейшее растворение GaN. Для исключения этого и растворения гидроокиси галлия в электролит добавлялось некоторое количество HCl.

Сначала ток течет в основном через проводящий поверхностный n -GaN(Zn) слой, который при этом растворяется. После растворения слоя n -GaN(Zn) положительный потенциал контакта замыкается через i -слой на лежащий под ним слой проводящего нелегированного n -GaN и вновь через i -слой на отрицательный потенциал электролита, что соответствует полярности возбуждения ЭЛ в структуре. Основной ток при этом течет через проводящие включения в i -слое. По мере их вытравливания все большая часть тока проходит через высокоомную активную часть i -слоя. Это приводит к постепенному возгоранию ЭЛ (см. рисунок), интенсивность которой можно контролировать визуально или с помощью фотоприемника. Процесс травления необходимо прекратить при выходе интенсивности ЭЛ на насыщение. В противном случае происходит растворение нелегированного n -GaN слоя, расположенного под i -слоем. Это снижает интенсивность ЭЛ, а также начинают отслаиваться участки i -слоя. Полное время травления до достижения максимума ЭЛ составляет 1–3 min. Интенсивность ЭЛ в процессе травления возрастает на 2–3 порядка, а $i-n$ -GaN-структуры становятся пригодными для изготовления светодиодов с приемлемыми для использования параметрами [12].

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы "Интеграция", проект № 75, а также при частичной поддержке Аризонского университета (США).

Список литературы

- [1] Pankove J.J. // J. Electrochem. Soc. 1972. V. 119. P. 1118.
- [2] Zolper J.C., Shul R.J. // MRS Bulletin/February. 1997. P. 36.
- [3] Minsky M.S., White A.M., Hu E.L. // Appl. Phys. Letter. 1996. V. 68. P. 1531.
- [4] Mileham J.R., Peatron S.J., Abernathy C.R., Mackenzie J.D., Shul R.J., Kilcoyne S.P. // J. Vac. Sci. Technol. 1996. A14(3). P. 836.
- [5] Vartuli C.V., Peatron S.J., Lee J.W., Abernathy C.R., Mackenzie J.D., Zolper J.C., Shul R.J., Ren F. // J. Electrochem. Soc. 1996. V. 143. (11). P. 3681.
- [6] Yontsey C., Adesida I., Bulman G. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71(15). P. 2151.

- [7] *Ohkubo M.* // Proc. of 2nd Int. Conf. on Nitride Semiconductors — ICNS'97. October 27–31. 1997. Tokushima, Japan, P2–24. P. 284.
- [8] *Ohkubo M.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. V. 36. L955.
- [9] *Rotter T., Uffmann D., Ackermann J., Aderhold J., Stemmer J., Graul J.* // Nitride Semiconductors: Mat. Res. Soc. Proc. 1998. V. 482. P. 1003.
- [10] *Ponce F.A.* // MRS Bulletin/February. 1997. P. 51.
- [11] *Дрижук А.Г., Сидоров В.Г.* // ФТП. 1986. Т. 20(1). С. 144.
- [12] *Drizhuk A.G., Zaitzev M.V., Sidorov V.G., Sidorov D.V.* // Compound Semiconductors: Proc. of 23rd Int. Symp. Compound Semiconductors. St. Petersburg, Russia. 23–27 September 1996 / Ed. by M.S. Shur and R.A. Suris (Inst. Phys. Conf. Ser. No 155: Chapter 4. Bristol and Philadelphia. 1997). P. 401.