

06.3;07

Эффективность и надежность излучающих металл–диэлектрик– полупроводник-структур на основе широкозонных полупроводников с униполярной проводимостью

© В.Г. Сидоров, А.Г. Дрижук, Д.В. Сидоров

Вологодский политехнический институт

Поступило в Редакцию 27 июня 1997 г.

Рассмотрена возможность увеличения эффективности и надежности источника излучения, изготавливаемых на основе полупроводников с униполярной проводимостью и работающих в условиях сильных электрических полей. Для этого активная область структуры изготовлена в виде чередующихся слоев различного сопротивления так, что области сильных полей пространственно отделены от областей генерации люминесценции. Предложенная идея практически реализована на $M-i-n$ -структурах из нитрида галлия. Приведены характеристики изготовленных светодиодных структур.

Проблема создания твердотельных источников излучения для коротковолновой части видимого спектра сохраняет свою актуальность. Трудности ее решения связаны с явлением самокомпенсации легирующих примесей собственными дефектами кристалла в широкозонных полупроводниках. Это явление не позволяет свободно управлять типом проводимости полупроводника и создавать эффективно излучающие $p-n$ -структуры. Полупроводник остается униполярным, поэтому продолжается поиск и синтез новых хорошо легируемых широкозонных полупроводников, а также совершенствование технологии выращивания и легирования уже известных. Можно идти и по пути создания нового типа излучающих структур на основе униполярных полупроводников, в которых можно было бы осуществлять эффективное возбуждение электролюминесценции. Реализации одной из таких возможностей посвящена настоящая работа.

Для возбуждения электролюминесценции в униполярных полупроводниках чаще других используются структуры типа металл–

диэлектрик–полупроводник. В наиболее эффективных металл–диэлектрик–полупроводник–структурах Д-область выполнена в виде полуизолирующего i -слоя из того же, но сильно компенсированного полупроводника, что и П-область. Причем компенсирующую примесь стараются выбрать так, чтобы одновременно она была и эффективным излучательным центром. При этом люминесценция возбуждается в i -слое структуры. Такой тип структур называется М– i – n -структурами. Механизм возбуждения электролюминесценции в них связан с ускорением основных, а также 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. Вероятность данных механизмов принципиально невелика. Самый простой способ повышения концентрации ”горячих” носителей заряда — это увеличение напряженности электрического поля в i -слое. Но это ведет к быстрой деградации и, в конечном счете, к пробоем структуры. Кроме того, для всех механизмов люминесценции с участием неравновесных носителей заряда эффективность электролюминесценции снижена из-за того, что рожденные в поле электроны и дырки разводятся полем в разные стороны и могут быть выведены из активной области до рекомбинации [1].

Для увеличения эффективности электролюминесценции необходимо возбуждение и люминесценцию локализовать на одних и тех же центрах, т. е. использовать в активной области дефекты с внутрицентровым механизмом люминесценции. К тому же данный механизм по сравнению с рекомбинационным, как правило, имеет более высокие значения внутреннего квантового выхода. При этом должна возрасти и надежность М– i – n -структур, поскольку такие центры, оставаясь в процессе возбуждения и излучения нейтральными, менее подвержены деградации в сильном электрическом поле. Еще большего увеличения срока службы М– i – n -структур можно ожидать, если центры вообще не подвергать действию сильного поля. Для этого достаточно пространственно отделить область сильного поля от активной области, содержащей дефекты с внутрицентральной люминесценцией, причем в первой осуществлять ускорение носителей заряда, а во второй — возбуждать центры люминесценции с помощью этих ускоренных носителей.

Для практического осуществления данного предложения в качестве полупроводника с униполярной проводимостью мы выбрали ныне уже

неуниполярный GaN. Когда планировался этот эксперимент, GaN с проводимостью *p*-типа еще не был получен. Создание нейтральных изоэлектронного типа дефектов с внутрицентральной люминесценцией предполагалось осуществить путем изовалентного легирования GaN акцепторной и донорной примесями одновременно, а конкретно — цинком и кислородом.

Слои GaN(Zn) и GaN(Zn,O) выращивались на сапфире (1012) методом газовой эпитаксии в хлоридно-гидридной системе в горизонтальном кварцевом реакторе струйного типа. Пары Zn доставлялись в зону роста потоком гелия, а кислород переносился в виде паров H₂O потоком аммиака. Температурные режимы процесса обеспечивали взаимодействие Zn и H₂O в зоне подложек для того, чтобы Zn и O могли встраиваться в решетку GaN в виде связанных пар Zn–O. Выращенные слои были ориентированы в плоскости (1120).

В присутствии O растворимость Zn в GaN увеличивается до 8–10%. Распределения Zn и O по толщине слоя хорошо повторяют друг друга. Концентрации Zn и O в слоях изменялись от $5 \cdot 10^{19}$ до $2 \cdot 10^{21}$ см⁻³. Удельное сопротивление GaN(Zn, O) всегда было примерно на два порядка ниже удельного сопротивления GaN(Zn) при одинаковых концентрациях Zn в этих слоях. На образование в GaN(Zn, O) связанных пар Zn–O указывает полоса остаточных лучей в спектрах ИК-отражения [2], характерная для кристаллов ZnO. В спектрах фотолюминесценции GaN(Zn, O) наряду с полосами, характерными для GaN(Zn), обнаружена новая полоса с максимумом 2.55 eV и полушириной 0.3 eV, имеющая линейную поляризацию. Появление этой полосы мы связываем с присутствием в GaN(Zn, O) дефектов, включающих Zn–O-пары. В спектрах фотолюминесценции GaN(O) данная полоса не наблюдалась. На внутрицентральной механизм люминесценции в обнаруженной полосе указывают: а) характер поляризационных диаграмм фотолюминесценции при возбуждении собственным и примесным светом; б) вид спектров возбуждения фотолюминесценции и в) отсутствие добавочной фотопроводимости в GaN(Zn, O) при любой поляризации возбуждающего характеристического примесного света.

Излучающие структуры *i*-GaN(Zn)–*i*⁺-GaN(Zn,O)–*n*-GaN/сапфир (рис. 1) выращивались в едином технологическом процессе. Слой не легированного низкоомного *n*-GaN служил буфером между подложкой и *i*-слоем и одновременно электрическим контактом к последнему. Выращивание этого слоя осуществлялось при 1050°C при средних

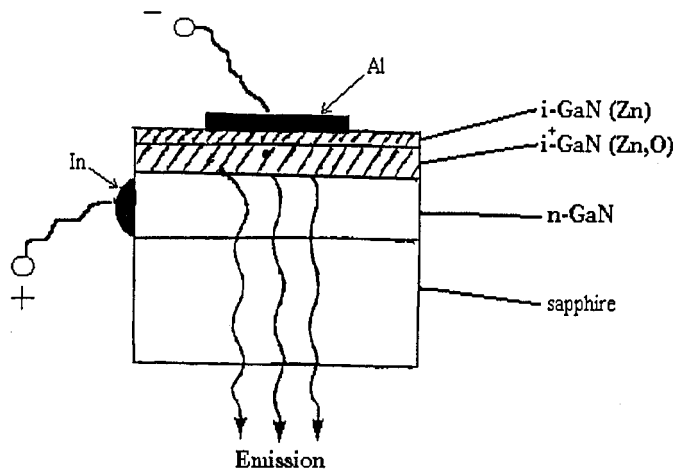


Рис. 1. Излучающая М-*i*-*n*-структура.

скоростях роста $20 \mu\text{m/h}$, что обеспечивало ему и активному *i*-слою высокое кристаллическое совершенство. Толщина *n*-слоя составляла $10\text{--}20 \mu\text{m}$. Концентрация и подвижность электронов имели значения $(5 \cdot 10^{19} \text{--} 10^{20}) \text{cm}^{-3}$ и $\sim 100 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Активная *i*-область выращивалась двухслойной при температуре $\sim 950^\circ\text{C}$ и скорости роста $(6\text{--}10) \mu\text{m/h}$. Характеристики этой области изменялись в пределах: слой *i*-GaN(Zn) — толщина $(0.05\text{--}0.5) \mu\text{m}$, удельное сопротивление $(10^5\text{--}10^7) \Omega \cdot \text{cm}$; слой *i*⁺-GaN(Zn,O) — $(0.3\text{--}3) \mu\text{m}$ и $(10^3\text{--}10^5) \Omega \cdot \text{cm}$ соответственно. При таком соотношении параметров слоев практически все напряжение, приложенное к структуре, падает на *i*-GaN(Zn)-слое, и при полном напряжении на структуре $4\text{--}50 \text{V}$ напряженность электрического поля в этом слое превышает 10^5V/cm , тогда как среднее поле в *i*-области не превосходит $(1\text{--}5) \cdot 10^4 \text{V/cm}$. Этих полей достаточно для ударной генерации неравновесных носителей заряда в *i*-GaN(Zn) слое и их ускорения до энергий, необходимых для возбуждения Zn-O центров в *i*⁺-GaN(Zn,O)-слое. Из-за асимметрии структуры это может произойти только при одной полярности напряжения на структуре — "минус" на контакте к *i*-GaN(Zn)-слою. Действительно, только при этой полярности напряжения наблюдалась в структурах эффективная

поляризованная электролюминесценция с характеристиками, совпадающими с поляризованной фотолюминесценцией в GaN(Zn,O). При постепенном сошлифовывании *i*-GaN(Zn)-слоя наблюдалось появление и постепенное увеличение интенсивности поляризованной фотолюминесценции, возбуждаемой со стороны поверхности структуры собственным светом. Одновременно наблюдалось постепенное исчезновение полос фотолюминесценции, характерных для GaN(Zn). Одновременно и более резко, чем толщина, уменьшалось полное сопротивление *i*-слоя и интенсивность поляризованной электролюминесценции.

При противоположной полярности напряжения на структуре ("плюс" на *i*-GaN(Zn)-слое) возбуждалась слабая неполяризованная электролюминесценция, спектры которой были близки к спектрам фотолюминесценции GaN(Zn). Отсюда следует, что в слое i^+ -GaN(Zn,O) условие сильного поля не достигается вплоть до электрического пробоя из-за малого сопротивления этого слоя. Это подтверждает такой эксперимент. После удаления *i*-GaN(Zn)-слоя поляризованную электролюминесценцию в структуре не удавалось возбудить ни при какой полярности напряжения. Но в этих же структурах после выращивания на поверхности i^+ -GaN(Zn,O), нового *i*-GaN(Zn)-слоя толщиной 0.1–0.2 μm вновь наблюдалась поляризованная электролюминесценция, причем только при "минусе" напряжения на этом слое. Более того, если на поверхности *i*-GaN(Zn) выращивался второй слой i^+ -GaN(Zn,O), то поляризованную электролюминесценцию можно было возбудить при любой полярности напряжения на структуре.

Все перечисленные экспериментальные факты доказывают, что выращены *i*-*n*-структуры с планируемым расположением и свойствами слоев, в которых область сильного электрического поля пространственно отделена от области возбуждения электролюминесценции, что возбуждение электролюминесценции осуществляется по ударному механизму, а люминесценция имеет внутрицентровую природу. На ударный механизм возбуждения центров люминесценции указывает и то, что возгорание электролюминесценции всегда наблюдается на линейном участке вольт-амперной характеристики, а зависимость интенсивности электролюминесценции от напряжения (рис. 2) подчиняется уравнению $\Phi = \Phi_0 \exp(-b/U^m)$, где параметр *m* принимает значения 1 и 2 в малых и больших полях соответственно [1].

На основе выращенных *i*-*n*-структур были изготовлены светодиоды различного типа: с голубым поляризованным излучением [2], с управляемым цветом излучения от голубого до красного [3], с белым цветом

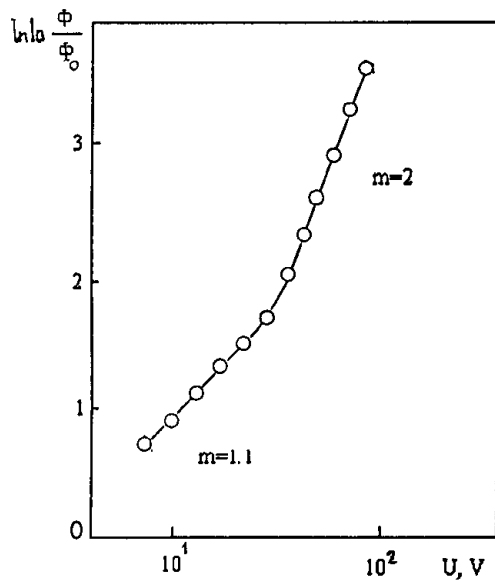


Рис. 2. Зависимость интенсивности электролюминесценции от напряжения для $M-i-n$ -структуры с активным слоем из $GaN(Zn,O)$.

излучения [4], а также светодиоды с повышенной светоотдачей [5]. КПД светодиодов составлял 0.1–0.3%, что на порядок превышает лучшие из известных значений для излучающих металл–диэлектрик–полупроводник-структур, созданных на униполярных полупроводниках. Светодиоды показали высокую стабильность и надежность в работе. В интервале температур 100–450 К их характеристики обратимо изменялись не более чем на 30%, а работоспособность сохранялась при 4–900 К. Необратимые изменения параметров бескорпусных светодиодов не превышали 10% в течение более 10 тысяч часов испытаний в рабочих режимах. При облучении электронами и протонами с энергией (1–5) MeV при дозах до 10^{16} cm^{-2} КПД светодиодов возрастал на $\sim 30\%$.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента не только подтверждена высказанная идея, но и получен новый материал $GaN(Zn,O)$ с уникальными свойствами, обладающий поляризованной

люминесценцией. В настоящее время, когда удастся устойчиво выращивать GaN p -типа, GaN(Zn,O) может быть с успехом использован при создании инжекционных светодиодов с голубым поляризованным излучением, например на основе $p-i-n$ -структур.

Работа выполнена при частичной поддержке Аризонского университета (США).

Список литературы

- [1] *Верещагин И.К.* Электролюминесценция кристаллов. М.: Наука, 1974. 279 с.
- [2] *Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22 (6). С. 67–71.
- [3] *Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22 (7). С. 50–52.
- [4] *Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22 (12). С. 23–25.
- [5] *Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22 (13). С. 33–36.