

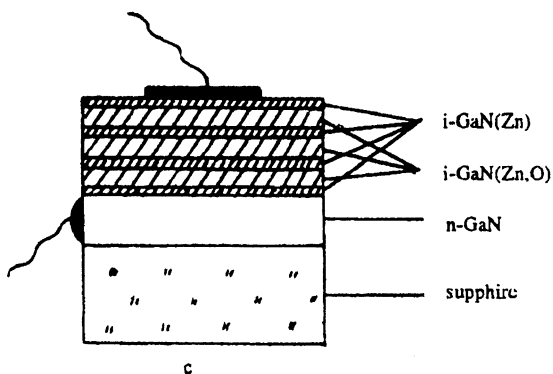
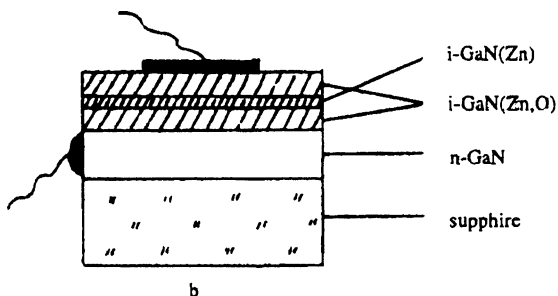
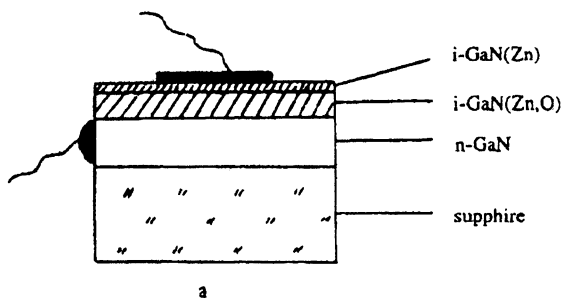
МНОГОЦВЕТНЫЕ СВЕТОДИОДЫ ИЗ НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ПОВЫШЕННОЙ СВЕТООТДАЧЕЙ

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

Использование в индикаторных системах многоцветных источников излучения позволяет увеличить количество и качество отображаемой информации, а также улучшить наглядность ее восприятия. Многоцветные светодиоды могут быть изготовлены на основе многослойных $p-n$ -структур с двумя и большим числом переходов, каждый из которых излучает свет своего цвета. При этом различный цвет излучения обеспечивается различными легирующими примесями в $p-n$ -переходах, как это сделано, например, в случае фосфида галлия [1,2], или путем создания $p-n$ -переходов в подложке и эпитаксиальном слое, выращенном на этой подложке, имеющих различную кристаллографическую модификацию и соответственно различную ширину запрещенной зоны, как это сделано в случае карбида кремния [3]. Управление цветом излучения в таких многопереходных светодиодах обычно осуществляется отдельным включением $p-n$ -переходов, а также величиной и полярностью напряжения на структуре. В настоящее время на таком принципе изготовлены светодиоды, изменяющие цвет излучения в диапазоне от зеленого до красного.

Полноцветным называют источник, способный излучать свет любого цвета в пределах видимого диапазона, включая дополнительные цвета и чисто белый. Конструкции известных полноцветных источников состоят из нескольких светодиодов, помещенных в общий корпус и излучающих основные цвета — красный, зеленый и синий. При этом светодиоды различного цвета изготавливаются из различных полупроводниковых материалов: красный — из GaPAs или GaAlAs, зеленый — из GaP, синий — из SiC или GaN. Полноцветных источников излучения, выполненных на одном кристалле одного полупроводникового материала, пока не создано.

В работах [4-6] продемонстрирована возможность создания на основе $i-n$ -структур из GaN светодиодов с различными спектральными характеристиками: голубых с 60%-ной линейной поляризацией излучения, с изменяющимся цветом излучения — от голубого до красного и с белым излучением. Достаточно высокая эффективность этих светодиодов (КПД=0.1-0.3%), работающих на ударных механизмах возбуждения электролюминесценции, достигнута за



Типы светодиодных структур на основе $\text{GaN}(\text{Zn},\text{O})$.

счет пространственного отделения области генерации люминесценции от области ускорения носителей заряда и создания в активной области светодиода дефектов с внутрицентральной люминесценцией, внутренний квантовый выход которой близок к 100%. В этих структурах i -область изготовлена в виде двух слоев: тонкого ($d = 0.05\text{--}0.5\text{ мкм}$) высокоомного ($\rho = 10^5\text{--}10^7\text{ Ом}\cdot\text{см}$) поверхностного слоя нитрида галлия, легированного цинком, и следующего за ним слоя ($d = 1\text{--}5\text{ мкм}$ и $\rho = 10^3\text{--}10^5\text{ Ом}\cdot\text{см}$) нитрида

галлия, легированного цинком и кислородом (см. рисунок, а). В первом GaN(Zn)-слое в сильном электрическом поле происходит ускорение электронов до энергий, достаточных для возбуждения во втором GaN(Zn, O)-слое дефектов молекулярного типа, содержащих цинк и кислород и обладающих внутрицентральной люминесценцией. Оптические диполи центров Zn-O расположены преимущественно в плоскости (0001) нитрида галлия симметрично относительно гексагональной оси *C*. Это обеспечивает 60%-ную линейную поляризацию люминесценции с азимутом, перпендикулярным оси *C*. Спектральные характеристики структур определяются уровнем легирования и соотношением толщин слоев GaN(Zn) и GaN(Zn, O). Асимметричное строение *i*-области допускает возбуждение поляризованной люминесценции, свойственной GaN(Zn, O), только при одной полярности напряжения на структуре — “минус” на контакте к *i*-GaN(Zn)-слою [7]. При обратной полярности напряжения электролюминесценция возбуждается лишь в слое GaN(Zn), причем это излучение всегда не поляризовано и возбуждается при более высоких напряжениях и с меньшей эффективностью.

Если в излучающей структуре высокоомный *i*-GaN(Zn)-слой расположить между двумя слоями из GaN(Zn, O) (см. рисунок, б), то электролюминесценция, свойственная GaN(Zn, O), возбуждается при любой полярности напряжения на структуре. При этом в случае одинаковых уровней легирования в слоях GaN(Zn, O) характеристики такого светодиода совпадают с аналогичными характеристиками, приведенными для светодиодов в [4-6]. Кроме того, такая конструкция светодиода позволяет совместить функциональные возможности всех трех типов светодиодов, описанных ранее [4-6]. Электрические и люминесцентные характеристики данного светодиода определяются соотношением уровней легирования в слоях GaN(Zn, O). Действительно, если в одном из слоев GaN(Zn, O) обеспечить концентрацию цинка $N_{Zn} \leq 10^{20} \text{ см}^{-3}$, характерную для светодиода с голубым поляризованным излучением [4], а во втором GaN(Zn)-слое уровень легирования довести до $N_{Zn} \geq 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что соответствует светодиоду с изменяющимся цветом излучения — от голубого до красного [5], то получим многоцветный светодиод, излучающий любой цвет в пределах видимого диапазона, включая белый [6]. Управление цветом излучения такого светодиода осуществляется изменением величины и полярности напряжения на диоде. Дополнительные возможности управления цветом излучения дает использование поворачивающегося поляроида, жидкокристаллической ячейки или ячеек Керра и Погкельса.

Из структур с чередующимися слоями i -GaN(Zn) и i -GaN(Zn,O) (см. рисунок, в) можно изготовить светодиоды любого типа из перечисленных выше, работающие на переменном, импульсном или постоянном любой полярности напряжениях и имеющие по сравнению с описанными выше светодиодами повышенную светоотдачу. Мощность излучения таких многослойных i - n -GaN структур увеличивается благодаря генерации электролюминесценции одновременно в нескольких активных GaN(Zn,O)-слоях. Но при этом пропорционально числу слоев увеличиваются и рабочее напряжение, и мощность, выделяющаяся в светодиоде. Увеличение числа слоев до более чем 2-3 пар приводит к равному тепловому пробую таких структур. Для светодиодов с многослойной i -областью достигнуто увеличение светоотдачи в 1.5-2.5 раза по сравнению со светодиодами, имеющими один активный GaN(Zn,O)-слой [4,6].

Работа выполнена при частичной поддержке Аризонского университета (США).

Список литературы

- [1] Galginaitis S.V., Fenner G.E., Ehle R.S. // Патент США, кл. 317-235 (H011 15/00) 1969. N 3611069.
- [2] Воробьев В.Л., Гришин В.Н., Ковырева Н.И. // Электронная техника. Сер. полупроводниковые приборы. 1977. В. 4. С. 33.
- [3] Алтайский Ю.М. и др. // Тез. докл. на VI Всесоюз. конф. по электролюминесценции. Днепропетровск, 1977. С. 79.
- [4] Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 6. С. 67-71.
- [5] Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 7. С. 50-52.
- [6] Дрижук А.Г., Зайцев М.В., Сидоров В.Г., Сидоров Д.В. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 11. С. 23-25.
- [7] Дрижук А.Г., Сидоров В.Г. // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 1. С. 144-146.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
26 апреля 1996 г.