

фиксированном положении уровня Ферми эта вероятность увеличивается. С этим же фактором, по-видимому, связан и существенный рост эффективности образования комплексов VO в кислородосодержащем n -Si при $T_{обл} = 673$ К, наблюдавшийся ранее в работе [10].

Наблюдаемое снижение скорости введения РД при $T_{обл} > 670$ К обусловлено, главным образом, тем, что комплексы VO и C_2O , не являются стабильными в этой области температур.

Таким образом, изменения времени жизни ННЗ кремниевых диодных p - n -структур в результате облучения электронами с $E = 6$ МэВ при температурах облучения $570 \div 670$ К в 1.5 раза выше по сравнению с $T_{обл} = 300$ К. Методом DLTS спектроскопии показано, что данный эффект обусловлен соответствующим увеличением эффективности введения комплексов вакансии – кислород и углерод внедрения – кислород внедрения с ростом температуры облучения в области $300 - 670$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lindstrom J. L., Murin L. I. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2002. В. 186. P. 121.
2. Murin L. I., Lindstrom J. L. et al. // Solid State Phenomena. 2005. Vol. 108-109. P. 267.
3. Buyanova I. A., Monemar B. et al. // Mater. Sci. and Engineering. 2000. Vol. 72. P. 146.
4. Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 3023–3032.
5. Кориунов Ф. П., Богатырев Ю. В. и др. // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2007. № 3. С. 113–116.
6. Кориунов Ф. П., Гатальский Г. В., Иванов Г. М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. Минск, 1978.
7. Маркевич В. П., Мури́н Л. И. и др. // В трудах 17 Междунар. совещ. «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 2007. С.434–439.
8. Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова Новосибирск, 1977. С. 256.
9. Кориунов Ф. П., Маркевич В. П. и др. // В сб. докл. Междунар. конф. по радиац. материаловедению. Алушта, 1991. Т. 4. С. 161–166.
10. Lalita J., Svensson B. G., Jagadish C. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. В. 1995. Vol. 96. P. 210–214.

МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ АВТОМОБИЛЬНОЙ СВЕТОТЕХНИКИ

Д. В. Балохонов, С. П. Сернов, Т. В. Колонтаева

¹Белорусский национальный технический университет

В настоящее время все большую популярность в качестве источников света приобретают полупроводниковые светодиоды. Это обусловлено их надежностью, малыми размерами, вибро- и влагуостойчивостью.

Практически все светодиоды с достаточно большим внешним квантовым выходом изготавливаются на базе излучающих свет полупроводниковых гетероструктур. Данная работа посвящена способам, с помощью которых можно получить свет из гетероструктур, применяемых в качестве излучающих областей для светодиодов, используемых в автомобильных светотехнических изделиях.

Как известно, типичная излучающая гетероструктура состоит из пяти слоев: слаболегированные *n*- и *p*-слои, роль которых заключается в подведении тока к излучающей области гетероструктуры, внутри них – сильнолегированные *n*- и *p*-слои, которые осуществляют инжекцию электронов и одновременно выполняют роль запирающих слоев, а внутри последних – слаболегированный (или нелегированный) излучающий слой. Доминирующая длина волны излучения светодиода зависит от ширины запрещенной зоны именно в этом слое. Поэтому, чтобы избежать нежелательных напряжений в решетке, в качестве материала для гетероструктурных светодиодов применяют тройные полупроводниковые соединения или полупроводниковые соединения из четырех элементов. Как правило, эти соединения при изменении их состава могут менять ширину запрещенной зоны в широких пределах, причем ширина запрещенной зоны зависит от стехиометрии этих соединений. Варьируя ширину запрещенной зоны излучающей области или ее легирование, можно данную гетероструктуру изготавливать из GaP, который прозрачен для красного света. В этом суть метода применения прозрачных окон в гетероструктурах.

Для устранения проблем с полным внутренним отражением света от граней получить разные длины волн излучаемого света.

Практически важным для автомобильной светотехники является получение трех цветов: желтого, красного и белого.

Красный и желтый свет можно получить из гетероструктур на базе соединения AlGaInP. Красный свет получается из гетероструктуры с широкой квантовой ямой при легировании излучающей области цинком и последующем отжиге полупроводника. Такой метод не требует обязательного выполнения условия квантования уровней энергии в квантовой яме гетероструктуры, поэтому ширина излучающей области может быть значительной (сравнимой с диффузионной длиной носителей заряда). Возможно, такая большая ширина квантовой ямы и применение цинка как центра рекомбинации и является причиной столь большого квантового выхода красных светодиодов на базе этой гетероструктуры.

Для получения желтого цвета свечения можно применить два подхода: первый заключается в замене цинка магнием при легировании структуры при соответствующем подборе ее состава, а второй заключается в использовании квантовых точек, квантовых колодцев или квантовых проволок, размер которых рассчитывается так, что в них существует лишь 2 энергетических уровня с разницей энергии между ними, которая соответствует длине волны желтого цвета. Рекомбинация как переход электрона из зоны проводимости в валентную зону в данном случае может и не иметь места, важен лишь переход электронов с уровня на уровень внутри квантовой структуры.

Очевидно, что у традиционных гетероструктурных светодиодов внешний квантовый выход достаточно мал. Причиной этого являются потери света на поглощение в полупроводнике и полное внутреннее отражение света от границ полупроводника. Решением первой проблемы является построение гетероструктурных светодиодов из соединений, являющихся прозрачными для испускаемого светодиодом света. Например, излучающая структура из AlGaInP испускает красный свет, и поэтому токоподводящие слои в кристалле используют кристаллы специальной формы. Например, фирма Philips при изготовлении мощных красных светодиодов Luxeon применяет кристалл в форме усеченной пирамиды, большее основание которой служит для вывода света. За счет наклонных граней пирамиды, отражающих свет в направлении

главной оптической оси светодиода, потери света уменьшаются и эффективность светодиода возрастает. Очевидно, что форма кристалла светодиода определяется требуемым световым распределением светодиода и той целью, для осуществления которой создается светодиод.

Для получения белого цвета свечения можно применять три светодиода красного, синего и зеленого цвета соответственно, а также синий или ультрафиолетовый светодиод, кристалл которого покрыт одним или несколькими слоями люминофора, который добавляет к синему такой цвет излучения, что светодиод и люминофор вместе испускают белый свет. Чем больше слоев различных люминофоров нанесено на светодиод, тем ближе его свет к белому. Однако при слишком большом количестве слоев люминофора интенсивность света понижается. Приблизить свет к белому можно также путем использования хорошо измельченных частиц люминофора.

В автомобильной светотехнике используют именно люминофорный способ получения белого света. Светодиоды синего цвета и ультрафиолетовые светодиоды получают на базе гетероструктур InGaN или GaN, легированных цинком или кремнием, работающим в качестве центра рекомбинации.

В настоящее время предпринимаются попытки создания белых светодиодов, спектр которых приближен к спектру естественного белого света, путем нанесения на матричную структуру массива квантовых точек, причем каждая точка имеет различный спектр электронных состояний [1]. При подключении структуры к источнику тока каждая квантовая точка излучает свою длину волны, отчего суммарное излучение прибора приобретает белый цвет. Подобного же эффекта можно достичь, применяя в качестве люминофора взвесь наночастиц какого-либо вещества, размеры которых подобраны так, чтобы они переизлучали полученную энергию на различных длинах волн. Последний способ основывается на свойстве наночастиц вещества при освещении излучать свет, длина волны которого зависит от размера частицы [3]. Недостатком двух описанных подходов является существенное изменение координат цветности белых светодиодов, полученных этими способами, во времени и при повышении температуры [1]. Возможно, причиной данного изменения является нагрев излучающего кристалла вследствие протекающего через него тока, который вызывает значительное изменение спектра электронных состояний внутри квантовых точек или столь же значительное изменение размера наночастиц люминофорного материала из-за теплового расширения. Возможно, выходом из данной ситуации могло бы послужить применение наночастиц из веществ с малым тепловым коэффициентом расширения.

Важно отметить перспективы использования второго подхода для получения цвета свечения светодиода, отличного от белого. Правильно подобрав размер наночастиц, с помощью ультрафиолетового излучающего кристалла можно получить, например, свет цвета морской волны с довольно стабильными в нормальных условиях характеристиками, так как размеры наночастиц практически не меняются от частицы к частице.

Однако самыми большими проблемами в сфере автомобильных светодиодов является очень малый внешний квантовый выход данных приборов и изменение координат цветности с ростом тока и температуры окружающей среды. Решением данных проблем могут послужить фотонные решетки. Фотонная решетка является периодической структурой в кристалле с периодом порядка нескольких постоянных кристаллической решетки. Фотонная решетка не позволяет фотонам с энергией, отклоняю-

щейся от некоторого значения, определяемого фотонной решеткой, покидать кристалл. Таким образом, доля фотонов с требуемой энергией и общая эффективность светодиода возрастают. С ростом тока и температуры фотонная решетка поможет избежать слишком значительных изменений в координатах цветности светодиодов. В ряде научных статей приводятся данные о том, что фотонные решетки, построенные с помощью двумерного структурирования поверхности омических контактов с целью получения двумерной фотонной сверхрешетки, повышают квантовый выход синих светодиодов практически в 2–2,5 раза (55 % против 18 – 20 %) [2]. Таким образом, применение фотонных решеток существенно повышает эффективность светодиодов.

Кроме того, особым образом структурированная внешняя излучающая поверхность кристалла может работать как сверхлинза, т. е. собирать свет в точку с размерами, меньшими длины волны излучаемого света [2]. Очевидно, что в автомобильной светотехнике такой эффект практически не применяется, но период структуры можно рассчитать так, чтобы получить световое распределение, указанное в международных автомобильных стандартах, без применения внешних оптических деталей. Это позволит упростить конструирование большинства автомобильных светодиодных фонарей, так как при наличии мощных светодиодов с требуемым встроенным световым распределением можно будет отказаться от сложных оптических деталей (оптические насадки и коллимирующие линзы) и сделать фонарь существенно дешевле.

В настоящее время бурно развиваются отрасли науки и технологии, связанные с органическими светодиодами, в частности, повышается их квантовый выход и эффективность. Это значит, что органические светодиоды скоро можно будет применять в качестве источников света для автомобильной светотехники. При этом органические светодиоды уже сейчас имеют ряд преимуществ по сравнению с обыкновенными светодиодами. Например, с помощью технологии органических светодиодов можно изготовить гибкий автомобильный фонарь с достаточно большой площадью свечения. Это позволит сильно упростить монтаж фонарей и позволит придавать им любую форму. Однако до этого еще слишком далеко, так как органические светодиоды являются дорогостоящей технологией.

Таким образом, в данной статье были описаны способы получения света из полупроводниковых светодиодов, применяемых в автомобильной светотехнике. Кроме того, в статье был рассмотрен ряд проблем, возникающих при использовании светодиодов в автомобильной светотехнике, а также предложены возможные пути решения данных проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошинская Н. В. Новые светодиоды. [Электронный источник] www.nanometer.ru, дата доступа 2 июня 2008 г.
2. Сапцова Л. А. Сверхъяркий светодиод с оптоэлектрически оптимизированным р-контактом (Выпускная квалификационная работа на степень бакалавра студентки гр. 354 Московского физико-технического института (государственного университета)).
3. Богданов К. Ю. Квантовые точки – рукотворные атомы наноразмеров. – Электронный источник] www.nanometer.ru, дата доступа 3 июня 2008 г.