

КАПИТОНОВ С. С., ТУЕВ В. И., СОЛДАТКИН В. С., ГУЩИН Д. В.
ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Аннотация. В статье рассмотрены основные проблемы создания высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения на основе гетероструктур. Указаны основные физические эффекты, ограничивающие эффективность прибора, такие как эффект стягивания тока вблизи металлических контактов, а также явление полного внутреннего отражения излучения, сгенерированного в активной области. Определён перечень следующих научно-технических задач, требуемых решения для создания высокоэффективных источников УФ излучения на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами.

Ключевые слова: ультрафиолетовый светодиод, гетероструктура, эффективность, бактерицидное устройство.

KAPITONOV S. S., TUEV V. I., SOLDATKIN V. S., GUSHCHIN D. V.
PROBLEMS OF CREATING HIGH-EFFICIENCY SOURCES
OF ULTRAVIOLET RADIATION BASED ON HETEROSTRUCTURES

Abstract. The main problems of creating highly efficient sources of ultraviolet radiation based on heterostructures are considered in the article. the main physical effects are indicated, limiting the efficiency of the device, such as the effect of current constriction in the vicinity of metal contacts, as well as the phenomenon of total internal reflection of radiation generated in the active region. The list of the following scientific and technical problems is determined, the required solutions for the creation of highly efficient UV radiation sources based on heterostructures with multiple quantum wells.

Keywords: ultraviolet light-emitting diode, heterostructure, efficiency, germicidal device.

В настоящее время одним из актуальных направлений светотехники является развитие имеющегося научного задела до стадии готовности к практическому применению технологии интеллектуального роботизированного производства надёжных полупроводниковых источников ультрафиолетового излучения, бактерицидных устройств на их основе и организация серийного производства подобных приборов.

В настоящее время применяется следующая классификация ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра. Весь УФ диапазон состоит из трёх поддиапазонов: УФ-А (390–315 нм), УФ-В (315–280 нм), УФ-С (меньше 280 нм). Поддиапазон УФ-А соответствует солнечному излучению, проходящему через атмосферу и достигающему поверхности Земли даже через облака. Это излучение опасно для здоровья человека. Излучение УФ-В поддиапазона

частично поглощается в озоновом слое Земли и также опасно для здоровья, тогда как УФ-С от Солнца до Земли не доходит [1].

В связи со сложной эпидемиологической обстановкой, установившейся в нашей стране и мире, наибольший интерес представляет развитие источников излучения в диапазоне УФ-С, поскольку электромагнитные волны в данном диапазоне обладают бактерицидными свойствами. Для создания диодов на указанный диапазон УФ излучения на внутреннем фотоэффекте с собственным поглощением необходимы кристаллические материалы с шириной запрещённой зоны от 3,18 до 4,4 эВ. Данные значения ширины запрещённой зоны указывают на то, что использовать необходимо диэлектрические материалы. К наиболее подходящим материалам относятся соединения $A^{III}N$, из которых совершенными в структурном отношении являются AlN , GaN , InN . Их ширина запрещённых зон составляет 6,1 эВ, 3,4 эВ и 0,77 эВ соответственно. Следовательно, в качестве основного материала для изготовления УФ светодиодов на основе гетероструктуры с квантовыми ямами подходит только AlN . Барьерные слои следует изготавливать из AlN или в комбинации с GaN , достаточной для получения требуемой глубины квантовой ямы. Сами квантовые ямы надо делать из этого материала с добавлением большего количества GaN : $Al_xGa_{1-x}N$. Для получения требуемой длины волны излучения УФ диапазона из выражения для зависимости ширины запрещенной зоны материала квантовой ямы от содержания алюминия:

$$\Delta E_g^{A_xB} = \Delta E_g^A + (\Delta E_g^B - \Delta E_g^A) \cdot x + x \cdot (1-x) \cdot E_b.$$

Можно найти процент содержания алюминия в материале квантовой ямы с учетом энергии параболического изгиба – $E_b = 1.0$ эВ. Расчеты показывают, что в материалах УФ светодиода процентное содержание алюминия оказывается достаточно высоким: $x=0,25-0,32$.

Столь высокое содержание добавки в виде Al приводит к снижению структурного совершенства плёнки $Al_xGa_{1-x}N$: в ней возрастает концентрация точечных дефектов, кластеров, полных и частичных дислокаций, приводящих к увеличению скорости безизлучательной рекомбинации в котреловской атмосфере дислокаций. Это одна из причин низкого качества изготавливаемых УФ-диодов [1, 2].

Основным элементом УФ-излучателей является УФ-кристалл. При разработке УФ-кристаллов с высоким КПД основными физическими эффектами, ограничивающими эффективность прибора, являются эффект стягивания тока вблизи металлических контактов,

а также явление полного внутреннего отражения излучения, сгенерированного в активной области.

Эффект стягивания тока вблизи металлических контактов заключается в локализации максимальной плотности тока в области, перелагающей к периметру омического контакта. При таком протекании тока фактически используется менее 30 % активной области гетероструктуры (рис. 1а, TG/LED). При этом, такое стягивание тока вызывает значительный локальный перегрев всей структуры в целом, а также генерацию квантов в области преимущественно под металлическими контактами, которые препятствуют их выходу из структуры. Устранить данное явление возможно с применением на поверхности слоя растекания тока (рисунок 1а, DG/LED). Введение слоя растекания тока позволяет значительно улучшить энергетические и электрические характеристики кристаллов светодиодов, что обеспечит его высокий КПД (рисунок 1б).

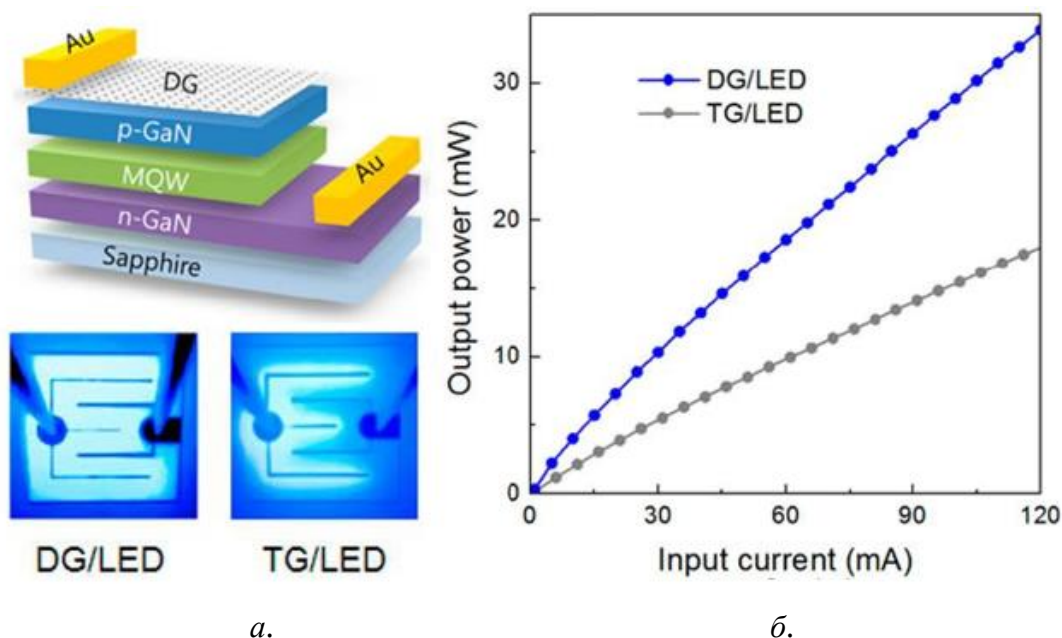


Рис. 1. Применение слоя растекания тока в конструкции УФ-кристаллов.

Эффект полного внутреннего отражения сгенерированного излучения возникает за счет того, что сгенерированный квант излучения, попадая на зеркальную границу раздела полупроводник/среда со значительной вероятностью претерпевает отражение, возвращаясь обратно в полупроводниковый кристалл. Для того чтобы уменьшить вероятность такого отражения, не приводящего к выходу излучения из кристалла, необходимо сделать отражение не зеркальным, а диффузным – рассеянным. В следствие этого актуально исследование возможности создания кристалла со значительно развитой поверхностью (рисунок 2а), что будет приводить к падению излучения на нее под произвольным (не

предсказуемым) углом, а значит вероятность того, что энергия покинет кристалл, уже достаточно велика, тем самым увеличивается эффективность УФ-диода (рисунок 2б).

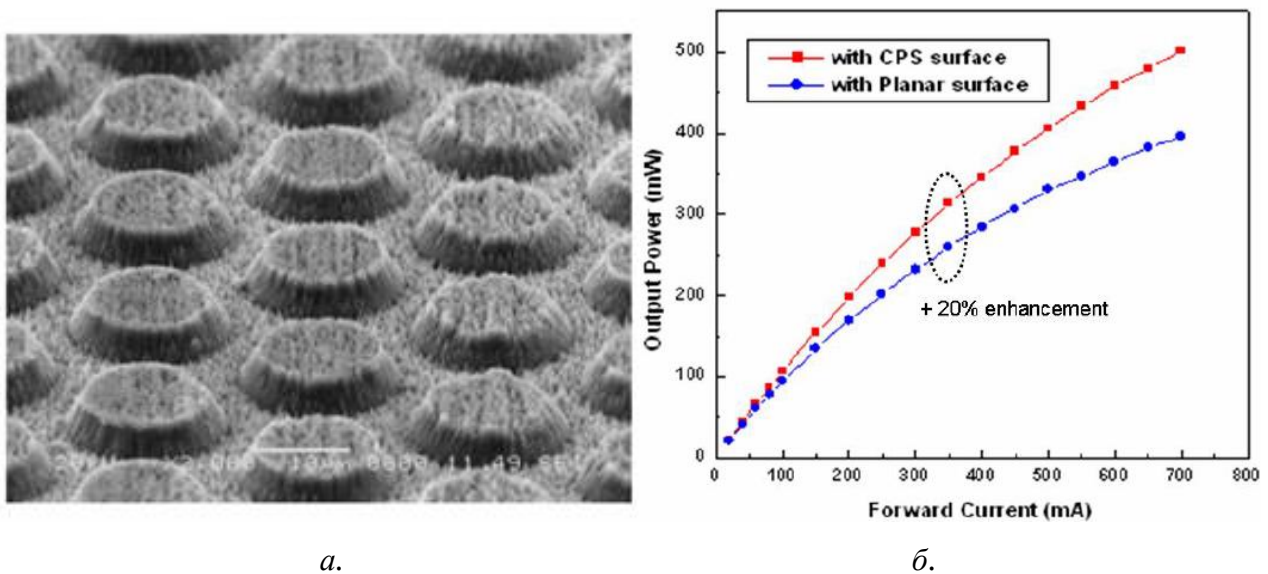


Рис. 2. Морфология CPS поверхности (а) и зависимость выходной мощности кристаллов с CPS поверхностью от тока (б).

После окончания исследования проводится отработка и корректировка технологических операций, необходимых для изготовления УФ-диодов с улучшенными энергетическими параметрами, основные из которых следующие.

1. Жидкостное и плазмохимическое травление наногетероструктуры на основе для получения мезы, а также для формирования наноструктурной поверхности.

2. Исследование контактного сопротивления многослойной металлизации к п- и р-слоям наногетероструктуры для получения наилучшего контактного сопротивления омических контактов.

3. Оработка технологического процесса нанесения слоя растекания тока, в качестве которых будет использоваться плёнки новых оптически прозрачных в УФ диапазоне материалов.

Низкое значение эффективности излучения УФ-диодов диктует необходимость разработки способов её повышения. Одной из основных причин её низкого значения является высокое поле спонтанной и пьезоэлектрической поляризации внутри квантовой ямы и вызванное им пространственное разделение неравновесных носителей заряда в квантовых ямах, то усилия разработчиков УФ-диодов должны быть направлены на уменьшение величины поляризации [7].

Если поле спонтанной поляризации изменить не представляется возможным, то управлению подлежит величина пьезоэлектрического поля, в основе которого лежит упругая деформация на межфазной границе «квантовая яма – барьерный слой». При решении этой

задачи необходимо также учитывать электрическое поле, создаваемое пирозлектрическим эффектом, определяемого температурой нагрева излучающего элемента и величиной пирозлектрического коэффициента материала элемента, который в AlN один из самых больших среди соединений « $III - N$ » [1–3; 5–7].

Повышение эффективности излучения УФ гетероструктуры может быть также достигнуто за счёт оптимизации захвата носителей заряда квантовой ямой и увеличения числа захватываемых носителей. Согласно результатам предварительного расчёта, указанные способы повышения эффективности могут быть реализованы путём изменения энергетического спектра ямы и оптимизации её профиля [8–10].

Проблема высокого тепловыделения УФ излучающей гетероструктурой – основная проблема создания высокоэффективного источника ультрафиолета, в основе которой лежит проблема низкой эффективности источника данного типа, а также низкая эффективность используемых методов отвода излишков тепла от активного элемента в окружающее пространство.

Основными традиционными способами охлаждения светоизлучающего прибора, изготавливаемого с применением светодиодных гетероструктур, являются размещение светоизлучающих элементов на металлическом радиаторе различной формы, а также наполнение внутреннего объема прибора молекулярным гелием под давлением порядка 0,1 атм. В ряде случаев для улучшения условий охлаждения разрабатываются новые формы стеклянной колбы с увеличенной площадью охлаждения, в которой размещаются светоизлучающие элементы. Перечисленные способы охлаждения не обеспечивают достаточной эффективности охлаждения, что, в конечном счёте, ограничивает мощности излучения создаваемого светоизлучающего прибора [11].

Для повышения эффективности охлаждения светоизлучающих элементов представляется целесообразным направить избытки энергии, которые имеют место при работе излучающих гетероструктур: тепловая энергия, выделяемая этими элементами, а также энергия коротковолнового излучения, сопровождающего излучение с требуемой длиной волны. Превращение указанных видов энергии в форму, удобную для создания процессов, охлаждающих как сами нагревательные элементы – светодиодные гетероструктуры, так и стенки стеклянной колбы светоизлучающего прибора, может быть выполнено с использованием электрокалорического эффекта в пирозлектриках, который имеет наибольшую величину в сегнетоэлектрических кристаллах. В качестве другого способа перевода формы избыточной энергии могут быть использованы внутренний и внешний фотоэффекты с переносом поглощенных избытков энергии неравновесными

носителями заряда в специально нанесённых полупроводниковых слоях, нанесённых на внутреннюю поверхность колбы и на крепление излучающих гетероструктур [11].

Предварительные оценки эффективности указанных направлений по разработке дополнительных способов охлаждения светоизлучающих приборов показывают возможность улучшение их охлаждения как совместно с традиционно используемыми способами, так и отдельно от них [7; 11].

Отдельно стоящая задача исключения из потока выходящего излучения наряду с излучения с заданной длиной волны, части излучения с более высокой энергией квантов может быть решена в рамках задачи улучшения охлаждения светоизлучающего прибора. Это может быть реализовано подбором спектра поглощения тонкоплёночных покрытий на внутренней поверхности колбы. Сгенерированные неравновесные электроны будут удаляться за счёт действия электрического напряжения, приложенного этим покрытиям [7].

Ещё одной причиной низкой эффективности УФ-диодов является увеличение спонтанной поляризации в веществе квантовой ямы. Дело в том, что вещество барьерного слоя и квантовой ямы на основе AlN растёт вдоль полярного направления, представляющего собой ось симметрии шестого порядка точечной группы симметрии кристалла $6mm$, которая является полярным направлением. По этой причине растущая поверхность пленки представляет собой А- или В-поверхности, на которых выходят ионы алюминия или азота. Это приводит к формированию встроенных (спонтанных) полей вследствие большой величины константы спонтанной поляризации в AlN [2, 3]. Величина спонтанной поляризации в этом материале [3; 4]. В итоге величина электрического поля спонтанной поляризации в квантовой яме может достигать нескольких единиц МВ/см [5–7].

К указанным механизмам поляризации в квантовой яме следует добавить поле, создаваемое пьезоэлектрическим эффектом, причём z-компонента вектора пьезополяризации в кристаллах AlN одна из самых больших среди материалов $A^{III}N$ [4]. Величина пьезоэлектрического поля пропорциональна изменению температуры кристалла, которое в рабочих условиях составляет около 100°C . Учитывая неоднородность тока в гетероструктурах из-за высокой дефектности выращиваемых слоёв $AlN / Al_xGa_{1-x}N$ величина пьезоэффекта может превысить влияние пьезоэлектрического эффекта, который в гетероструктурах $GaN / In_xGa_{1-x}N$ является основным механизмом поляризации квантовых ям [6].

В результате внутри слоёв светодиодной гетероструктуры действует большое электрическое поле, значительно превышающее 10^6 В/см. Столь большое электрическое поле в квантовой яме приводит к пространственному разделению пакетов неравновесных носителей зарядов ввиду различия зарядов электронов и дырок. Смещение центроидов

зарядов в ямах приводит к уменьшению скорости излучательной рекомбинации носителей заряда в разноразряженных квантовых ямах светодиодных гетероструктур. Тем самым происходит снижение внутренней квантовой эффективности источника УФ излучения до значения около 0,3 % на длине волны 280 нм [2; 3; 5].

Следующая причина низкой эффективности УФ светодиодов вытекает из предыдущих, но физически имеет самостоятельную природу – это высокая температура рабочего кристалла при сравнительно малых рабочих токах. Если у светодиодных гетероструктур на основе барьеров $GaN/InGaN$ плотность рабочего тока составляет порядка 100 мА/мм², то у гетероструктур на основе $AlN / Al_xGa_{1-x}N$ он на порядок меньше.

Таким образом, для создания высокоэффективных источников УФ излучения с $\lambda < 0.30$ мкм на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами необходимо решение следующих научно-технических задач:

1) разработка технологических приёмов выращивания слоёв из AlN , обеспечивающих снижение их дефектности и повышения вероятности излучательных переходов в квантовых ямах из $Al_xGa_{1-x}N$ [2; 3; 5];

2) разработка физических принципов и технологических приемов по увеличению внутренней квантовой эффективности эмиссии излучения в квантовых ямах [8–10] на основе $Al_xGa_{1-x}N$ с высоким содержанием алюминия;

3) разработка физических способов и конструкторского решения по улучшению охлаждения излучающих элементов светоизлучающих приборов [11], изготовленных на основе УФ светодиодных гетероструктур из барьеров $AlN / Al_xGa_{1-x}N$ в том числе с использованием фундаментальных свойств кристаллических материалов [7; 11];

4) разработка физических принципов и технических решений их реализующих, не только исключаящих из потока генерируемого излучения высокоэнергетичных фотонов с энергией выше 4,2 эВ, вредного для здоровья человека, но и исключаящих дополнительный нагрев светоизлучающего прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. Юновича А. Э. – М.: Физматлит. 2008. – 495 с.
2. Шевченко Е. А. Квантово-размерный эффект Штарка и локализация носителей в квантовых ямах $AlGaIn/AlGaIn$ с различной морфологией // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – №8. – С.1022–1026.
3. Wood C., Jena D. Polarization Effects in Semiconductors: From Initio Theory to Device

Applications. – N.Y.: Springer, 2008. – 515 p.

4. Шалдин Ю. В., Matyjasik S. Пирозлектрические свойства широкозонного полупроводника AlN в области 4.2-300 К // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – № 9. – С. 1159–1165.
5. Супрядкина И. А., Абгарян К. К., Баженов Д. И., Мутигуллин И.В. Исследование поляризаций нитридных соединений $(Al, Ga, AlGa)N$ и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – № 12. – С.1647–1651.
6. Davydov V. N. Polarization properties of the InGaN/GaN heterostructures under heating // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 57. – No. 12. – P. 1648–1457.
7. Давыдов В. Н. Основы кристаллографии и кристаллофизики. Часть 2. Физические свойства кристаллов. – Lambert Academic Press; Издательско-книготорговый центр «Академкнига», 2014. – 92 с.
8. Давыдов В. Н., Задорожный О. Ф., Лапин А. И. Фононный спектр гетероструктуры с множественными квантовыми ямами // Изв. вузов. Физика. – 2020. – Т. 64. – № 4.
9. Davydov V. N., Karankevich O. A. Capture and emission of charge carriers by quantum well // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol.61. – No. 2. – P. 223–231.
10. Давыдов В. Н., Задорожный О. Ф., Туев В. И., Солдаткин В. С., Давыдов М. В., Вилисов А. А. Патент РФ. Светодиодная гетероструктура с квантовыми ямами комбинированного профиля. RU 2 729 046 С1. Рег. номер 2019123050 от 17.07.2019.
11. Давыдов В. Н., Туев В. И., Афонин К. Н., Солдаткин В. С., Давыдов М. В., Вилисов А. А. Патент РФ. Светодиодный источник излучения. RU 2 723 967 61 С1. Заявка № 2019133066 от 16.06.2019.