

# История изучения светоизлучающих диодов на основе многокомпонентных гетероструктур AlGaInN

Олег РАБИНОВИЧ

Статья посвящена основным этапам развития и становления одного из самых интересных на данный момент видов инновационной техники — светоизлучающих диодов.

## Введение

Не зря древние говорили: “Per crucem ad lucem” («Через крест к свету»). Это верно — у светоизлучающих диодов (СИД) очень сложная, но увлекательная история. Трудно назвать другую область современной науки и техники, которая оказывала бы сейчас столь же сильное воздействие на развитие экономики и науки, как полупроводниковая электроника [1]. Подобно тому, как изобретение транзистора Уильямом Брэдфордом Шокли (William Bradford Shockley) (рис. 1), Уолтером Хаузером Браттейном (Walter Houser Brattain) (рис. 2) и Джоном Бардином (John Bardeen) (рис. 3) в 1947 г. привело к вычислительному изобилию наших дней, оптоэлектроника как научно-техническое направление, стартовав на заре прошлого века, приобрела такую динамику развития, что становится правомерным сравнение оптоэлектроники с очередной научно-технической революцией [2, 3].

За последнее десятилетие произошел прорыв в исследованиях и производстве нитридных многокомпонентных гетероструктур (МКГ), а также приборов на их основе.

Нитридные материалы привлекают к себе пристальное внимание из-за их уникальных свойств. Одно из наиболее значимых преимуществ соединений III группы, таких как GaN, InN, AlN и их твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ , — это широкий диапазон изменения ширины запрещенной зоны от 1,95 до 6,3 эВ в зависимости от состава твердого раствора [4–7]. Именно поэтому у данных материалов существует значительный потенциал для использования их в коротковолновой, электролюминесцентной, высокотемпературной, высокоомощной и высокочастотной электронике. Обширный диапазон изменения ширины запрещенной зоны, сильные связи взаимодействия и высокая теплопроводность GaN и его твердых растворов делают их особенно интересными для применения в оптоэлектронике, например в полноцветных эк-

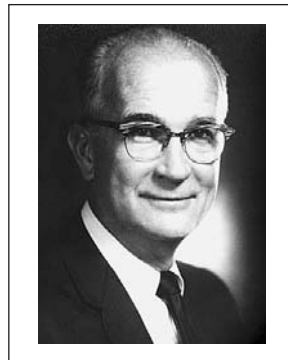


Рис. 1. Уильям Брэдфорд Шокли

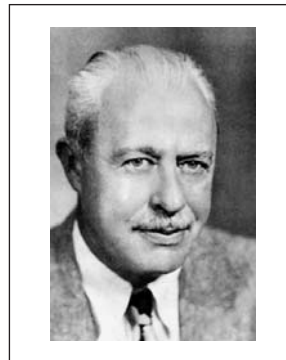


Рис. 2. Уолтер Хаузер Браттейн



Рис. 3. Джон Бардин

ранах, емкостных накопителей информации, «солнечно-слепых» фотоприемниках, ультрафиолетовых детекторах, СВЧ-приборах, светоизлучающих и лазерных диодах [8].

Эпоха светоизлучающих диодов имеет более чем столетнюю историю. В начале XX века было опубликовано несколько статей, в которых описывалось явление излучения света из материалов при воздействии электрических полей — этот эффект был назван «фотолюминесценция». В то время свойства и структуру материалов нельзя было точно определять, да и сам процесс эмиссии еще не был изучен.

## Вехи изучения AlGaInN светоизлучающих диодов

Британский радионинженер, капитан Генри Джозеф Раунд (Henry Joseph Round) (рис. 4), личный помощник Гульельмо Маркони (Guglielmo Marconi) (рис. 5), открыл прообраз современного СИД совершенно случайно [9–13].

Это произошло во время исследования электрических свойств карборундового детектора (SiC). Он обнаружил свечение, исходящее от твердотельного материала, при пропускании электрического тока через него. Раунд расска-

зал об этом интересном эффекте в 1907 г., опубликовав заметку всего в два параграфа (рис. 6), где описал только сам эффект — желтое свечение от двухполярной структуры с асимметричным протеканием тока.

Как писал известный американский ученый-исследователь и историк Эгон И. Лёбнер (Egon E. Loebner), Раунд описал необычное явление и уточнил, что данное свечение от кристаллического детектора для радиоприемников, называемого «кошачий ус», — не следствие нагрева, а «холодное свечение». Он не проводил дополнительных, углубленных исследований, так как обнаружение дан-



Рис. 4. Генри Джозеф Раунд



Рис. 5. Гульельмо Маркони

**A Note on Carborundum.**

—

*To the Editors of Electrical World:*

**Sirs:**—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole. A bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

New York, N. Y. H. J. Round.

Рис. 6. Заметка Генри Джозефа Раунда

ного явления было сопутствующим во время его работы.

В 1923 г. наш соотечественник, двадцатилетний ученый Олег Владимирович Лосев (рис. 7) провел детальное измерение ВАХ SiC-детектора и обнаружил, что подача прямого и обратного напряжений приводит к свечению.

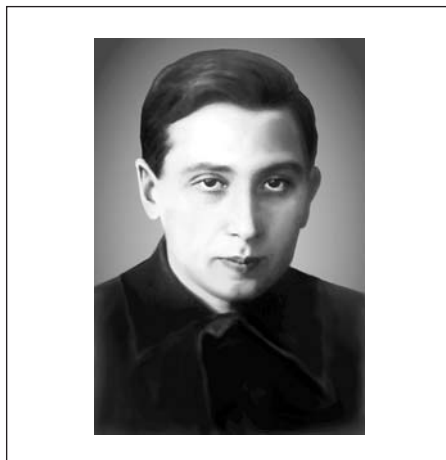
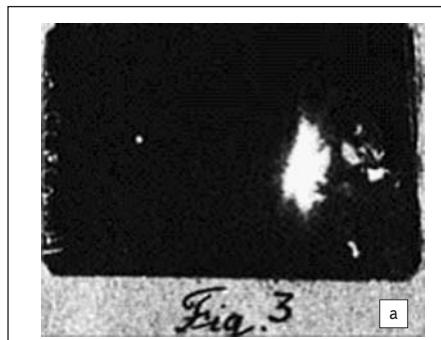


Рис. 7. Олег Владимирович Лосев

Он впервые смог сфотографировать свечение, испускаемое SiC-детектором, содержащим случайно созданный *p-n*-переход при пропускании тока через него (рис. 8), который был в виде диода со структурой металл-полупроводник [9–14].

Сегодня это может быть просто объяснено, потому что мы знаем, что ионизация и инжекция неосновных носителей заряда приводят к свечению из твердотельного материала. Лосев был первым, кто тщательно изучил этот эффект, названный потом электролюминесценция.

О. В. Лосев открыл не только инжекционную электролюминесценцию (свечение II в его терминах), которая в настоящее время лежит в основе СИД и полупроводниковых



лин шкалы которого 1,00-110 эв, 110 ее значениям и построены кривые 1–4, относящиеся к зондам (рис. 5,  $S_1, S_2, S_3, S_4$ ). Кривые рис. 5 получены для второй части монокристалла (рис. 4), размыленного на две части. Толщина всего монокристалла 395 мкм, на активный слой приходится 11 мкм. Характеристики зондов также были сняты по нескольким рис для контроля — не сместились ли какой-либо зонд во время спайки кристалла.

По рис. 5 может быть прослежена роль отдельных слоев активного слоя. Мы видим, что падение потенциала несимметрично и зависит от направления тока для зондов наименее проводящих слоев *p* (см. диаграмму рис. 1) активного



Рис. 6.

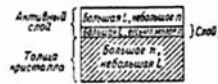


Рис. 7.

слоя. Эти слои — между зондами  $S_3$  и  $S_4$  на рис. 6, на рис. 5 несимметричные части заштрихованы.

Падение потенциала в толще кристалла симметрично, а при малых и средних плотностях тока для толщ сара-ведели даже закон Ома. Падение потенциала в месте контакта главного электрода  $S_1$  (рис. 5 и 6) в верхней области активного слоя несимметрично и только симметрично (рис. 5, кривая 1). Таким образом, выпрямительное действие не может быть отнесено ни за счет контакта, ни за счет толщ или контакта толщ со вторым электродом большой поверхности — нижним на рис. 1, 4, 6.

Происхождение унipoлярной проводимости и выпрямительного действия связано со свойствами особого активного слоя. Оно может быть объяснено различием энергии  $eV$  электронов проводимости, приобретаемой ими на длине их свободного пути при движении с той или другой стороны к слою *p* (рис. 1) в зависимости от направления тока. В соответствии с этим получаются раз-

Рис. 8. а) Свечение карборундового детектора; б) статья Олега Владимировича Лосева

лазеров, но и явление предпробойной электролюминесценции (свечение I), которое также широко применяется при создании новых электролюминесцентных дисплеев [9]. Спустя почти 20 лет явление возникновения свечения при протекании тока в кристаллах вновь было «открыто» в Америке, но не в карборунде, а в некоторых кристаллофосфорах. Его обнаружил известный французский ученый Дестрио (G. Destriau). Он, однако, с самого начала отметил приоритет Лосева, и свечение карборунда в Америке получило название “Losev-light”.

Первую современную интерпретацию излучения света от *p-n*-перехода предложил Курт Леховек (Kurt Lehovec) с соавторами из компании Signal Corps Engineering Laboratories (New Jersey) в 1951 г. [11–13, 15]. Эти ученые развивали научные положения, выдвинутые Лосевым, но на другом уровне понимания физических процессов и имеющих данных. Они утверждали, что люминесценция является следствием инжекции неосновных носителей заряда при подаче прямого напряжения.

Следующий знаменательный этап — это монокристалл GaAs, выращенный Велкером

(Welker) с соавторами и продемонстрированный ими в 1952 году. Данный материал является замечательной подложкой при производстве многих проборов, например СИД, инжекционных лазеров, которые начинали тогда разрабатывать в компаниях General Electric, IBM и Lincoln Laboratories.

Первые СИД, излучающие в видимой области спектра и основанные на материалах  $A^{III}B^V$ , были созданы в 1955 г. Вольфом (Wolff) с соавторами в компании Signal Corps Engineering Laboratories. GaP СИД излучал оранжевый свет, но этот прибор был неэффективным и не подготовлен для массового производства.

Прогресс в исследованиях и производстве СИД последовал с развитием новых материалов для СИД красного, желтого, оранжевого и зеленого цветов свечения, которые производились в 60–70-х гг. прошлого века. В 1960 г. были созданы первые СИД и лазеры ближнего ИК-диапазона на основе GaAs. Параллельно с этим появились фотоприемники на основе полупроводников  $A^{III}B^V$  [16].

Основными материалами  $A^{III}B^V$  в то время считались GaPAs, GaP:N, GaPAs:N, GaP:Zn,  $O_2$ . СИД на основе этих материалов были более эффективны по сравнению с СИД Вольфа (Wolff), но далеки от нынешних показателей СИД, основанных на многокомпонентных гетероструктурах AlGaAs, AlGaInP и, конечно же, AlGaInN. Главной сложностью было создание СИД синего цвета свечения, которое началось в 60-х гг. XX века. В 1963 г. Жорес Иванович Алферов (рис. 9) с соавторами выдвинул идею использования в излучателях гетеропереходов, и с того времени под его руководством в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР проводились интенсивные работы по исследованию гетеропереходов  $GaAs-Al_xGa_{1-x}$  [17].

В 1966 г. ими впервые была обнаружена эффективная излучательная рекомбинация в *p-n*-переходах четырехкомпонентных твер-



Рис. 9. Жорес Иванович Алферов

дых растворов арсенида фосфида галлия индия и показано, что ее квантовый выход, по крайней мере, не ниже, чем в арсениде галлия. В 1970 г. Ж. И. Алферов с соавторами предложил использовать четырехкомпонентные соединения для получения гетеропереходов. Их преимущество — возможность изменять параметр решетки при постоянной ширине запрещенной зоны, изменять ширину запрещенной зоны при неизменном параметре решетки или оба эти параметра изменять одновременно.

В 1963 г. Нельсон разработал метод жидкостной эпитаксии применительно к арсениду галлия, который сыграл в дальнейшем важную роль в совершенствовании СИД [18]; Дин, Гершензон и Каминский в 1967 г. установили определяющую роль азота в зеленой электролюминесценции *p-n*-переходов в фосфиде галлия при комнатной температуре, что позволило в дальнейшем при использовании метода жидкостной эпитаксии получить высокоэффективные СИД с зеленым цветом свечения; в 1966 г. Руппхерт, Вудалл, Коннерс и Петит методом жидкостной эпитаксии получили высокоэффективную *p-n*-структуру из арсенида галлия, *n*- и *p*-области которой были легированы кремнием. На основе этой структуры и полусферической конструкции кристалла позднее были созданы ИК-диоды с внешним квантовым выходом излучения до 28%.

В 1966 г. Ник Холоньяк (Nick Holonyak) (рис. 10) продемонстрировал метод эпитаксиального выращивания кристаллов [19].



Рис. 10. Ник Холоньяк

В 1969 г. Герберт Поль Маруска (Herbert Paul Maruska) и Джеймс Тиджен (James Tietjen) впервые смогли вырастить пленку монокристаллического GaN на сапфировой подложке методом гидридной газофазной эпитаксии [20, 21].

Этот материал был автолегирован до *n*-типа проводимости, а *p*-тип создавался при помощи изолирующего материала.

В 1971 г. Розенцвейг, Логан и Виегман показали возможность создания светоизлучающих диодов с переменным цветом свечения между красным и зеленым цветами на основе использования двухполосного излучения *p-n*-перехода в GaP; в дальнейшем на основе двухполосного излучения были созданы высокоэффективные СИД с желтым и оранжевым свечением [18].

Нитрид галлия обладает более высокой электропроводностью, чем сульфид цинка, что позволяет использовать его в качестве основы для электролюминофора. Исследования люминесценции этого соединения начались в конце 1950-х гг. В 1966 г. компания Bell Telephone Labs Inc. заявила два изобретения на нитрид галлия и электролюминесцентное устройство на его основе [17].

Первый синевато-зеленый СИД со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) создал Жак Панков (Яков Исаевич Панченков) (Jacques I Pankove) с соавторами в 1971 г. (рис. 11) [1–3, 16, 22].



Рис. 11. Жак Панков

Эти СИД изготовляли путем эпитаксиального осаждения нитрида галлия, обладающего электронной проводимостью, на сапфировую подложку, после наносили изолирующий слой из нитрида галлия с примесью цинка. СИД синего цвета свечения получали при более низком давлении паров цинка [23].

В 1977 г. советские ученые В. П. Сушков (рис. 12), А. С. Адонин и В. С. Абрамов совершили интересное открытие, относящееся к технологии полупроводникового приборостроения.

Целью работы было создание многоцветного источника света с перекрестной коммутацией и увеличение числа излучающих элементов. Поставленная цель была достигнута таким образом: после операции нанесения металлических контактов в одном из направлений проводили разделение *min*-переходов, например, путем вытравливания полосок в GaN до Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а в перпендикулярном направлении соединение *min*-перехо-



Рис. 12. Валерий Петрович Сушков

дов осуществляли после нанесения с обратной стороны подложки против отдельных *min*-переходов стоксовского люминофора для преобразования синего и ультрафиолетового излучения в более длинноволновое видимое излучение, в частности, белого свечения [24].

В 1985 г. Исаму Акасаки (Isamu Akasaki) (рис. 13) и Хироши Аmano (Hiroshi Amano) с соавторами смогли вырастить высококачественный бездефектный GaN на сапфировой подложке с помощью новой, к тому времени, технологии низкотемпературного буферного слоя (в качестве которого использовался слой AlN), используя метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD-процесса) [21].



Рис. 13. Исаму Акасаки

В 1989 г. они добились возможности контролировать концентрацию магния (Mg) при выращивании GaN, используя Sr<sub>2</sub>Mg (бисциклопентадиенил магния) в качестве источника легирующей примеси *p*-типа. Затем впервые японские ученые получили *p*-тип GaN с малым сопротивлением методом обработки слоя пучком электронов низкой энергии (low energy electron beam irradiation — LEEBI), то есть GaN, легированный Mg, был получен с использованием низкотемпературного буферного слоя и воздействием электронного пучка на эпитаксиальную структуру, способствовавшими замещению атомов Ga атомами Mg [23].

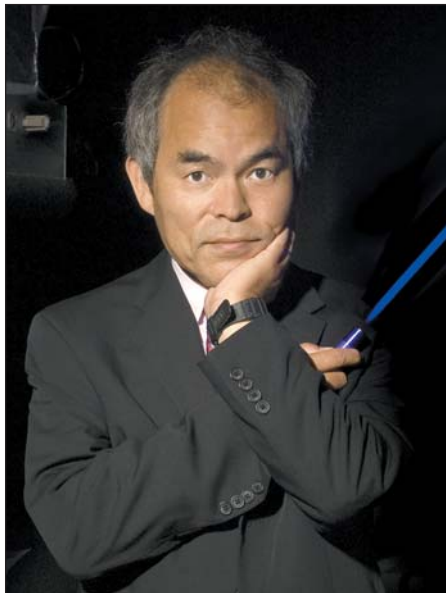


Рис. 14. Суджи Накамура

Справедливости ради здесь следует упомянуть о работах Г. В. Сапарина и М. В. Чукичева, выполненных в 1981–1982 гг. Эти ученые обнаружили люминесценцию пленок GaN под действием электронного пучка, но тогда они не смогли объяснить причину появления яркого свечения.

И. Акасаки и Х. Аmano с соавторами в 1989 г. продемонстрировали первый УФ СИД с *p-n*-переходом, в 1991 г. вырастили AlGaIn *p*-типа, а в 1994 г. — InGaIn. В 1992 г. Суджи Накамура (Shuji Nakamura) (рис. 14) успешно получил GaN *p*-типа отжигом Mg-GaN в атмосфере азота, используя в качестве источника примеси  $\text{Sr}_2\text{Mg}$  [21, 23].

Подвергнув образец отжигу в атмосфере азота, он обнаружил, что сопротивление материала понизилось, и таким образом выяснил, что эффект был не следствием обработки пучком электронов, а результатом прогрева. Позже оказалось, что получению проводимости *p*-типа препятствовало влияние атомарного водорода, который легко диффундировал в объем кристалла и образовывал нейтральные комплексы с Mg, подавляя акцепторный эффект. С. Накамура решил не копировать подход И. Акасаки (осознавая возможные проблемы с патентованием) и вместо AlN использовал GaN. Он получил зеркальную поверхность, а измерив электрические характеристики, обнаружил, что GaN даже лучше: подвижность носителей заряда оказалась выше. С. Накамура усовершенствовал метод MOCVD-процесса, введя два отдельных потока газов: главный, переносящий с высокой скоростью параллельно подложке смесь компонентов реакции, и вспомогательный, направленный перпендикулярно подложке. Роль вспомогательного потока очень важна: без него не может быть получена непрерывная пленка и на подложке образуются отдельные островки. Свой первый СИД синего цвета све-

чения С. Накамура изготовил 28 марта 1991 г. Результатом исследований стали сообщения в 1994 г. на весенней конференции в Сан-Франциско (MRS — Material Research Society, Spring Meeting, San Francisco, 1994) об организации выпуска СИД синего цвета свечения на основе GaN. Об этом сообщил И. Акасаки (Meijo University Nagoya) и представители компании Nichia Chemical Ind. Ltd. Типичные СИД имели силу света 100–200 мкд при токе 10 мА и напряжении 11–13 В на длине волны 482 нм.

К настоящему времени внешний квантовый выход СИД синего и зеленого цветов свечения составляет более 20% и 10% соответственно. В 1991 г. К. Ито (К. Itoh) с соавторами зафиксировал эффект квантовых размеров, используя AlGaIn/GaN квантово-размерную яму (КЯ), которая была выращена на высококачественном GaN [21].

Множественные квантово-размерные ямы (МКЯ) InGaIn/GaN, которые сейчас используются как рабочая область в диодах на основе нитридов, впервые использовали С. Накамура и И. Акасаки с соавторами в 1995 г. [3, 16, 17, 19–22].

### Общая характеристика нитридных многокомпонентных гетероструктур

Превосходная физическая и химическая стабильность нитридных полупроводников поз-

воляет использовать их в агрессивных средах. Более того, приборы на основе нитридов — одни из тех, что, как правило, не вступают в реакцию с внешней средой [3, 16, 17, 19–22].

Типичные виды МКГ AlGaInN в зависимости от используемой подложки представлены на рис. 15 [25].

Нитриды ( $A^{III}B^V$ ) и их твердые растворы, как отмечалось ранее, представляют класс материалов с некоторыми особенными свойствами, такими как большой диапазон изменения ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ), спонтанная поляризация (СП) и пьезоэлектрический эффект (ПЭ) [26, 27] (рис. 16).

Отличие нитридных элементов III группы ( $A^{III}N$ ) — это рекордные величины спонтанной поляризации (СП) и компонент пьезоэлектрического (ПЭ) тензора [28, 29]. Они приводят к сильным внутренним электрическим полям (до  $10^5$ – $10^7$  В/см), которые могут быть также следствием расслоения постоянных кристаллических решеток. (Впервые были зарегистрированы в 1993 г. М. Хэном (М. А. Khan [3, 16, 18, 20–23])). А также к формированию дефектов [30] и к особым оптическим свойствам [25, 30, 31]. Данные свойства важны при использовании этих материалов и приборов на их основе, так как СП стремится уменьшить коэффициент полезного действия (КПД) оптоэлектронных устройств, основанных на использовании МКЯ. В нитридах-пирозелетриках СП не может быть определена прямым измерением, пото-

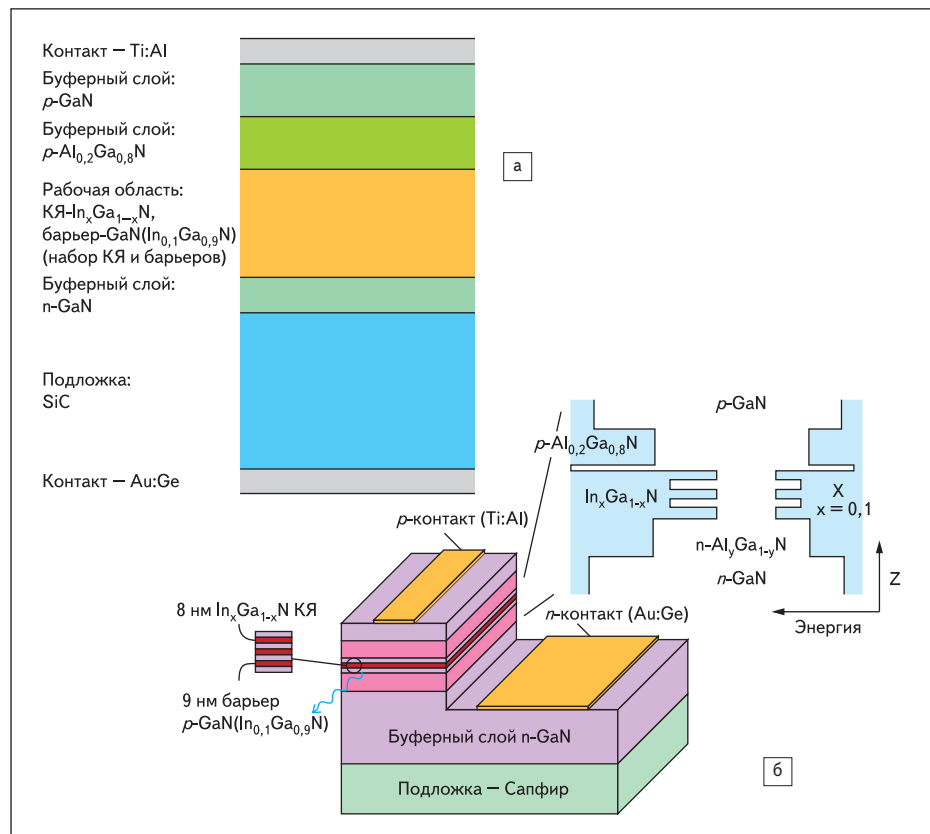


Рис. 15. Типичные виды многокомпонентных гетероструктур AlGaInN: а) на подложке карбида кремния (SiC); б) на подложке сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

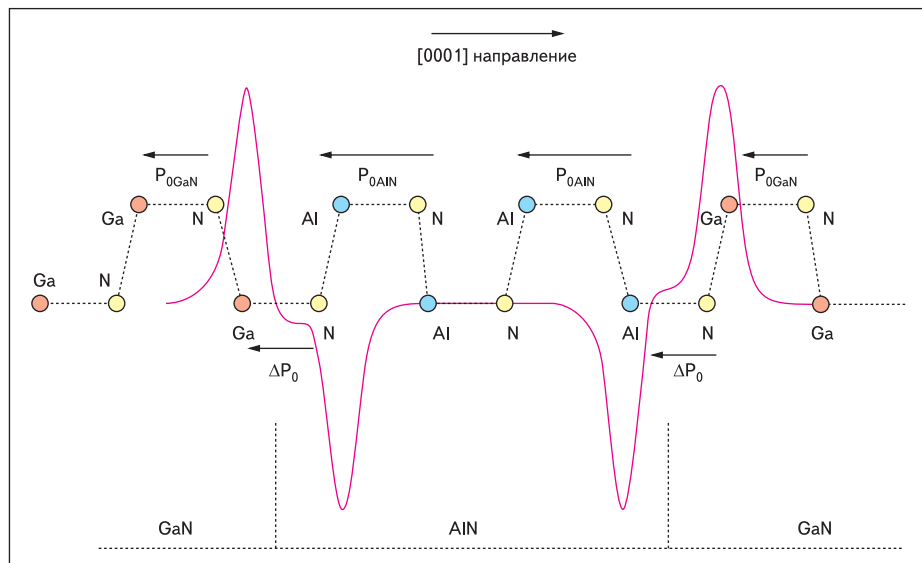


Рис. 16. Спонтанная поляризация

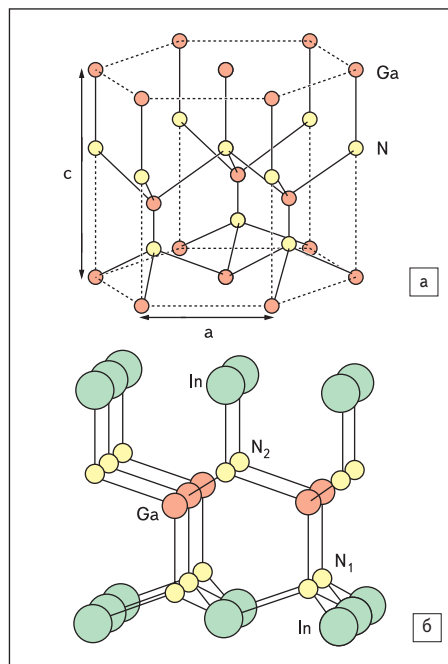


Рис. 17. Структура нитридных соединений (вюрцитная структура)

му что ее направление и ориентация не могут изменяться и всегда параллельны оси кристалла нижней сингонии, так называемой пирроэлектрической оси.

Среди тетраэдрических соединений у пирроэлектриков наиболее часто встречается вюрцитная структура (рис. 17) [26, 32].

В вюрцитных кристаллах пирроэлектрическая ось параллельна направлению (0001), и СП будет аналогично ориентирована. В пирроэлектриках постоянная поляризация является собственным свойством, связанным с природой связей в материале, чья природа определена. Но при этом можно считать неотъемлемым свойством тот факт, что геометрический центр электронов в твердом рас-

творе не совпадает с центром положительных зарядов.

Равнозначность между четырьмя связями с соседними атомами в кубических полупроводниках может быть изменена, если приложить напряжение к кристаллической структуре в направлении (111). В этом случае связь вдоль направления (111) укорачивается/удлиняется и совершенная симметрия  $sp^3$  гибридизации разрушается. Получаемая поляризация называется пьезоэлектрической (ПЭ), потому что наводится механическим воздействием. Разница между СП и ПЭ заключается только в эффекте, вызывающем поляризацию: механическое напряжение для ПЭ; внутренняя асимметрия в связях кристалла при равновесии для СП. СП может возникнуть в кубических кристаллах из-за легирования. Заметно, что в соединениях типа  $A^{III}B^V$  СП имеет отрицательное значение. Так как СП в вюрцитных структурах параллельна оси "c", отрицательные значения указывают на то, что СП не параллельна обычному направлению (0001). Обычное направление, принимаемое за положительное, идет параллельно связи в направлении оси "c" и соединяет атомы Ga с их первыми соседними атомами N, следуя по направлению от Ga к N. Это означает, что электрический диполь, связанный с элементарной ячейкой, ориентирован вдоль оси "c" в направлении от атома N к атому Ga.

Значение спонтанной поляризации в нитридах очень большое, например, у AlN его СП — наибольшая из известных значений у соединений с вюрцитной структурой. Пьезоэлектрические коэффициенты тоже очень велики в этих структурах, они в 20 раз больше, чем в типичных соединениях типа  $A^{III}B^V$  или  $A^{II}B^{VI}$ .

У нитридов типа  $A^{III}B^V$ , выращенных в направлении "c", поляризационный заряд скапливается на каждой стороне слоев [11, 33–35]. В результате этих зарядов появляются внут-

ренние электрические поля, что существенно воздействует на оптические и электрические свойства этого класса полупроводников. Данное электрическое поле отталкивает электроны и дырки друг от друга так, что они разделены в КЯ. Следствием этого является уменьшение скорости рекомбинации и излучения, что возможно, является причиной снижения внутреннего квантового выхода. Внутреннее поле также означает, что спектр излучения будет смещаться при воздействии тока. Это ограничивает возможности использования устройств на основе нитридных материалов [36, 37]. Это особенно заметно при ширине КЯ более 10 нм [11, 33–35]. Для уменьшения этого эффекта КЯ делают меньше по ширине, обычно 2–3 нм. Дислокации электрически заряжены, и область вокруг них либо притягивает, либо отталкивает свободные заряды в соответствии с законом Кулона. Причина этого — полярность дислокаций и зарядов. Например, если дислокация имеет положительный заряд, то электроны захватываются, а дырки отталкиваются из-за потенциала, созданного дислокацией. Собранные электроны будут экранировать потенциал дислокации, тем самым уменьшая отталкивающий потенциал для дырок. В конце концов электроны и дырки будут совершать безызлучательную рекомбинацию из-за отрицательного заряда дислокации. Данные виды поляризации появляются на границах слоев/поверхностей между элементами III и V групп, вследствие напряжения, которое становится результатом различных постоянных решетки [38, 39]. Комбинированная (совместная) поляризация создает поляризационно возникший электростатический заряд на поверхностях МКЯ. В СИД, содержащих InGaN МКЯ, наведенный заряд преобладает из-за пьезоэлектрического эффекта, возникающего вследствие большого различия постоянных решетки между соединениями InN и GaN, а также из-за напряжения в материале, где присутствует изменение ширины  $E_g$  по его длине. Поляризационные эффекты проявляются в КЯ, в частности, как квантово-размерный эффект Штарка (рис. 18) [40].

Было установлено и измерено, что свойства InGaN/GaN/AlGaN МКЯ СИД существенно зависят от содержания металлов (In/Al) в слоях МКЯ [40–45]. Например, спектр фотолуминесценции зависит от распределения кластеров атомов индия (In) (где их больше, там и интенсивность излучения выше), что объясняется локализацией носителей заряда (электронно-дырочных пар) и квантово-размерным эффектом Штарка в активной области. При большом содержании атомов In ( $X > 0,25$ ) они могут играть и отрицательную роль — быть ловушками (дополнительными энергетическими уровнями), образовывать дислокации и V-образные дефекты, изменять и изгибать внутреннее электрическое поле вокруг КЯ. По результатам исследований были сделаны выводы: внутреннее поле возникает перво-

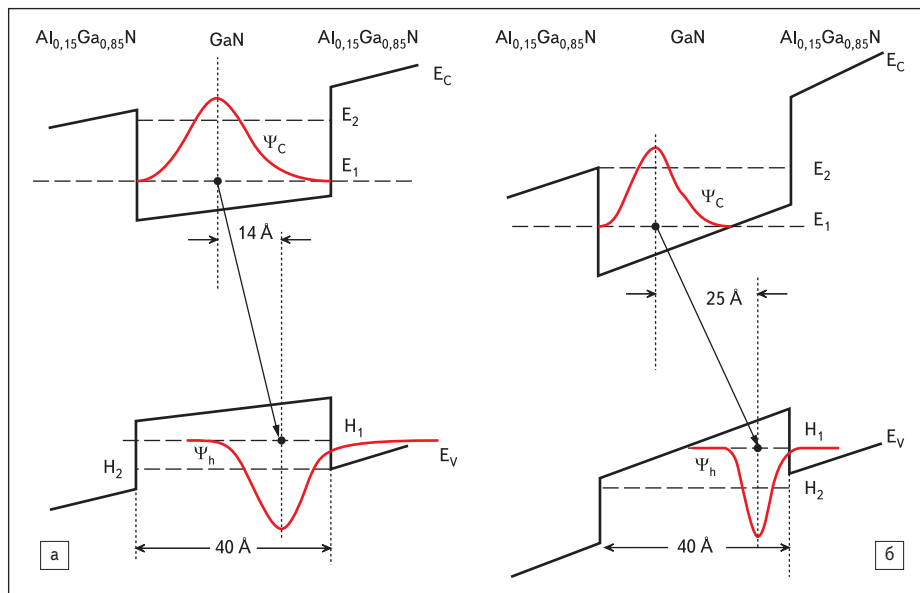


Рис. 18. Эффект Штарка

начально из-за заряда СП, который образуется на гетерограницах GaN/AlGaIn/InGaIn и с несколько меньшей зависимостью от ПЭ поля, вызванного напряжением (рассогласованием параметров кристаллических решеток (подложки и МКГ, КЯ и барьера) и тепловой деформацией [40, 46–51]). Данное внутреннее поле (эффект Франца-Келдыша) вызывает: 1) изгиб зон и «красный» сдвиг, что связано с локализацией экситонов, донорно-акцептерными переходами, квантово-размерным эффектом Штарка (из-за большого рассогласования постоянных кристаллических решеток КЯ и барьера), который значительно превосходит «синий» сдвиг; 2) постепенное разделение волновых функций электронов и дырок с увеличением ширины КЯ, что приводит к уменьшению силы излучения и увеличению времени затухания.

## Заключение

Подводя итог всему изложенному, необходимо отметить, что сейчас огромное количество исследований и гигантские темпы усовершенствования технологий AlGaInN МКГ и СИД создают благоприятные условия для дальнейшего развития оптоэлектроники в целом и, в частности, светоизлучающих диодов.

Будем надеяться, что следующие результаты исследований и разработок в области светоизлучающих диодов не заставят нас долго ждать, и мы будем опять гордиться достижениями наших соотечественников наравне с успехами зарубежных ученых. ■

## Литература

1. Остроумов А. Г., Рогачев А. А. О. В. Лосев — пионер полупроводниковой электроники // Сб. научн. тр. Физика: проблемы, история, люди / Под ред. В. М. Тучкевича. Л., 1986.

- Интернет-сайт ВИКИПЕДИЯ — свободная энциклопедия: <http://ru.wikipedia.org>
- Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника / Пер. с франц. О. Н. Ермакова. М.: Техносфера, 2004.
- Soh C. B., Chua S. J., Lim H. F. et al. Identification of deep levels in GaN associated with dislocations // J. Phys.: Condens. Matter. 2004. V. 16.
- Off J., Kniest A., Vorbeck C. et al. Influence of buffer layers on the In content of GaInN layers // J. Cryst. Growth. 1998. V. 195.
- Zaldivar M. H., Fernandez P., Piqueras J. Influence of deformation on the luminescence of GaN epitaxial films // Semicond. Sci. Technol. 1998. V. 13.
- Jhou Y. D. et al. Nitride-based light emitting diode and photodetector dual function devices with InGaIn/GaN multiple quantum well structure // Sol. State Electr. 2005. V. 49.
- Gao F., Bylaska E. J., Weber W. J. Intrinsic defect properties in GaN calculated by ab initio and empirical potential methods // Phys. Rev. B. 2004. V. 70.
- Новиков М. А. Олег Владимирович Лосев — пионер полупроводниковой электроники // Ф.Т.Т. 2004. Т. 46. № 1.
- Round H. J. A Note on Carborundum // Electrical World. 1907. V. 49.
- Schubert E. F. Light-emitting diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- Loebner E. E. Subhistories of the Light Emitting Diode // IEEE Trans. on Elect. Dev., 1976. V. ED-23.
- Schubert E. F., Kim J. K. Light-emitting diodes hit the century milestone // Compound Semiconductor. 2007. October.
- Носов Ю. Р. О. В. Лосев — изобретатель кристаллина и светодиода // Электросвязь. 2003. № 5.
- Lehovec K., Accardo C. A., Jamgochian E. Injected light emission of silicon carbide crystals // Phys. Rev. 1951. V. 83.
- Сушков В. П. Светодиоды и лазеры — это СиЛа // Светодиоды и лазеры. 2002. № 1–2.
- Осинский В. И., Привалов В. И., Тихоненко О. Я. Оптоэлектронные структуры на многокомпо-

нентных полупроводниках. Минск: Наука и техника, 1981.

- Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Энергоиздат, 1983.
- Holonyak N. Jr. From transistors to lasers and light-emitting diodes // MRS Bulletin. 2005. July.
- Maruska H. P., Tietjen J. J. The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal line GaN // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15.
- Akasaki I. Nitride semiconductors — impact on the future world // J. Cryst. Growth. 2002. V. 237–239.
- Steele R. V. The story of a new light source // Nature photonics. 2007. V. 1.
- Бахтизин Р. З. Голубые диоды // Ресурс Интернета. Архив. Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 3.
- Сушков В. П. Способ изготовления многоэлементных электролюминесцентных полупроводниковых источников света. Авторское свидетельство № 635813. М.: 1978.
- Ponce F. A., Bour D. P. Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices // Nature. 1997. V. 386.
- Piprek J. Nitride Semiconductor Devices. Principles and Simulation. Weinheim-Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- Osinski M. Gallium-Nitride-based Technologies. A Critical Review, Bellingham-Washington: SPIE-Optical Engineering Press, 2002.
- Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides // Phys. Rev. B. 1997. V. 56.
- Shimada K., Sota T., Sazuki K. First-principles study on electronic and elastic properties of BN, AlN and GaN // J. Appl. Phys. 1998. V. 84.
- Park S.-H., Chung S.-L. Piezoelectric effects on electrical and optical properties of wurtzite GaN/AlGaIn quantum well lasers // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72.
- Grandjean N., Damilano B., Dalmaso S. et al. Built-in electric-field effects in wurtzite AlGaIn/GaN quantum wells // J. Appl. Phys. 1999. V. 86.
- Al-Yacoub A., Bellaiche L. Piezoelectricity of ordered (Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>)N alloys // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79.
- Ambacher O., Majewski J., Miskys C. et al. Pyroelectric properties of Al(In)GaIn/GaN hetero- and quantum well structures // J. Phys.: Condens. Matter. 2002. V. 14.
- Grahn H. T., Ploog K. H. Polarization properties of nonpolar GaN films and (In, Ga)N/GaN multiple quantum wells // Appl. Phys. A. 2004. V. 78.
- Katzir Sh. The discovery of the Piezoelectric Effect // Arch. Hist. Exact. Sci. 2003. V. 57.
- DenBaars S., Nakamura Sh., Speck J. Non-polar GaN reaches tipping point // Compound Semiconductor. 2007. V. 13. № 6.
- Kim K.-Ch., Schmidt M. C., Sato H. et al. Improved electroluminescence on nonpolar m-plane InGaIn/GaN quantum wells LEDs // Phys. Stat. Sol. Rapid Res. Lett. 2007. V. 1.
- Metzger R. New GaN faces offer brighter emitters // Compound Semiconductor. 2006. V. 12. № 7.
- Bernardini F., Fiorentini V. Polarization fields in nitride nanostructures: 10 points to think about // Appl. Sur. Sci. 2000. V. 166.

40. Morkoc H., Cingolani R., Gil B. Polarization effects in nitride semiconductor device structures and performance of modulation doped field effect transistors // *Sol. State Electr.* 1999. V. 43.
41. Morkoc H., Strite S., Gao G. B. et al. Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76.
42. Okamoto K., Kaneta A., Kawakami Y., Mukai T. et al. Confocal microphotoluminescence of InGaN-based light-emitting diodes // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98.
43. Lai Y-L., Liu Ch-P., Chen Zh-Q. Tuning the emitting wavelength of InGaN/GaN superlattices from blue, green to yellow by controlling the size of InGaN quasi-quantum dot // *Thin solid films.* 2006. V. 488.
44. Shapiro N. A., Perlin P., Kisielowski Ch. et al. The effects of indium concentration and well-thickness on the mechanisms of radiative recombination in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  quantum wells // *MRS Internet Journal.* N. S. R. 2000. V. 5. № 1.
45. Lin Y-Sh. Study of various strain energy distribution in InGaN/GaN multiple quantum wells // *J. Mater. Sci.* 2006. V. 41.
46. Hangleiter A., Im J. S., Kollmer et al. The role of piezoelectric field in GaN-based quantum wells // *MRS Internet Journal.* N. S. R. 1998. V. 3. № 15.
47. Wetzel Ch., Nitta Sh., Takeuchi T. et al. On the bandstructure in GaInN/GaN heterostructures — strain, band gap and piezoelectric effect // *MRS Internet Journal.* N. S. R. 1998. V. 3. № 31.
48. Widmann F., Simon J., Daudin B. et al. Blue-light emission from GaN self-assembled quantum dot due to giant piezoelectric effect // *Phys. Rev. B.* 1998. V. 58.
49. Natali F., Byrne D., Leroux M. et al. Inhomogeneous broadening of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum wells // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71.
50. Kaplar R. J., Kurtz S. R., Koleske D. D., Fischer A. J. Electroreflectance studies of Stark shifts and polarization-induced electric field in InGaN/GaN single quantum wells // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 95.
51. Chen C. H., Chen W. H., Chen Y. F., Lin T. Y. Piezoelectric, electro-optical and photoelastic effects in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  multiple quantum wells // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83.