

Люминесцентные исследования кубического нитрида бора, легированного бериллием

© Е.М. Шишонюк, Т. Taniguchi*, Т. Sekiguchi**

Институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Белоруссии,
220072 Минск, Белоруссия

* Advanced Laboratory, NIMS, Tsukuba, Japan

** NIMS, Tsukuba, Japan

E-mail: shishonok@ifftp.bas-net.by

(Поступила в Редакцию 6 июня 2006 г.

В окончательной редакции 9 ноября 2006 г.)

Исследованы спектры катодолюминесценции и фотолюминесценции монокристаллов кубического нитрида бора $c\text{BN}$, легированных бериллием в условиях высоких давлений и температур. Установлено, что легирование бериллием приводит к стабильному образованию в спектрах катодолюминесценции $c\text{BN}$ широкой полосы, положение максимума которой с увеличением концентрации примеси смещается в коротковолновую область спектра в интервале длин волн от ~ 315 до ~ 250 nm; при этом цвет кристаллов изменяется от темно-желтого до синего. По результатам исследований зависимостей структуры, интенсивности и положения максимума полосы от температуры измерения спектров катодолюминесценции предложена предварительная интерпретация ее природы в модели рекомбинации на дефектах донорного и акцепторного типов. Сделано предположение о присутствии вблизи валентной зоны легированного $c\text{BN}$ нескольких перекрывающихся подзон, связанных с разнорядными акцепторными уровнями бериллия. В спектрах фотолюминесценции легированных монокристаллов $c\text{BN}$ зарегистрированы три неизвестные ранее бесфоновые линии с энергиями 2.135, 2.27 и 2.60 eV.

Работа выполнена в рамках проекта 6-15 ГКПНИ „Нанометриалы и нанотехнологии“ 2006–2010 гг. (Белоруссия) с использованием некоторых данных, полученных в рамках работы Е.М. Шишонюк по STA grant (Japan).

PACS: 71.55.Eq, 74.25.Gz, 78.60.Hk, 78.55.-m

1. Введение

Кубический нитрид бора ($c\text{BN}$) известен как широкозонный полупроводник с уникальными свойствами, перспективный для использования в устройствах оптоэлектроники и микроэлектроники, работающих в экстремальных условиях высоких радиации и температуры, в химически агрессивных средах. Несмотря на возможные многофункциональные приложения (активные и пассивные элементы интегральных схем, устройства на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), детекторы различного предназначения, теплопроводящие подложки, холодные эмиттеры и т.п.), практическое использование $c\text{BN}$ сдерживается отсутствием кристаллов больших размеров, однофазных тонких пленок хорошего качества, наличием проблем легирования материала, отсутствием данных о его реальных свойствах и фундаментальных характеристик. Проблемы введения в кубический нитрид бора контролируемой примеси являются актуальными для использования $c\text{BN}$ в названных практических приложениях.

В настоящее время примесью, существенно влияющей на некоторые оптические и электрические свойства $c\text{BN}$, следует считать бериллий. Неизвестна ни одна примесь, которая стабильно проявлялась бы в колебательном спектре $c\text{BN}$, кроме бериллия, образующего в спектре комбинационного рассеяния материала

две широкие полосы при 215 и 535 cm^{-1} . Природа полос не определена однозначно [1,2]. Самостоятельных исследований люминесценции легированного бериллием $c\text{BN}$ не проводилось, однако в спектрах катодолюминесценции (КЛ) $c\text{BN}$, легированного бериллием [3], были зафиксированы широкие полосы с максимумами от 3.5 до 3.7 eV. В нескольких работах исследовалась излучательная способность светодиода на $c\text{BN}$, область которого с проводимостью p -типа была получена путем легирования материала бериллием, так как для $c\text{BN}$ и других полупроводников семейства A_3B_5 бериллий является надежным акцептором [4–8].

Ранее легированный бериллием $c\text{BN}$ синтезировался в виде порошков, монокристаллов и поликристаллов [9,10]. Проведены исследования электрофизических свойств легированного бериллием материала (вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, эффект Холла) и обнаружено, что в кубическом нитриде бора с различным содержанием примеси бериллий, возможно, образует акцепторный уровень в интервале 0.25–1.03 eV [9]. Установлено, что с увеличением концентрации бериллия энергия активации примеси в $c\text{BN}$ уменьшается.

В ряде работ предпринята попытка теоретически рассчитать энергетические состояния дефектов в $c\text{BN}$, включая примесь бериллия [11–17]. Например, показано, что атомы Be замещают бор в решетке $c\text{BN}$ с

формированием акцепторного уровня с энергией активации 0.11 eV. Замещение азота бериллием приводит к формированию акцепторного уровня в середине запрещенной зоны. Показано также, что энергия формирования разнорядных состояний примеси бериллия в *c*BN является функцией энергии Ферми материала различной стехиометрии (избыточное содержание бора или азота в *c*BN позволяет говорить о материале с различной стехиометрией). В позиции бора Ve_B имеет низкую энергию формирования, и для *c*BN с избытком бора и азота дефект Ve_B является доминантным. Донорный уровень бериллия в *c*BN может находиться на 5 eV выше валентной зоны. Для стехиометричного материала (т.е. материала с номинальным содержанием бора и азота) или материала *p*-типа отрицательно заряженный атом Be в позиции бора также является доминирующим центром. Оцененная в одной из упомянутых работ энергия перехода для атома Be в этой позиции из одного зарядового состояния в другие („0“/„-“) составила 0.4 eV, что находится в хорошем согласии с экспериментально полученным значением энергии активации [9] Ve -акцептора.

2. Эксперимент

Спектры КЛ с энергией возбуждающих электронов 10 keV регистрировались при температурах жидкого азота и гелия в диапазоне длин волн 200–800 nm, спектры фотолюминесценции (ФЛ) — при температуре жидкого азота в диапазоне 350–800 nm. Исследованные кристаллы были от черного и темно-синего до темно-желтого цвета, некоторые имели зональную окраску (мы ее называем также секторальной), когда кристаллы по форме представляли собой правильные шестиугольники с чередованием секторов темно-синего и желтого (либо светло-синего) цветов. Размеры исследованных кристаллов не превышали 200 μ m. Все кристаллы были получены в технике высоких давлений. В работе использовались также данные по КЛ монокристаллов, легированных бериллием (представленных для исследования Т. Taniguchi), полученные во время работы Е.М. Шишонов в рамках STA grant (Advanced Laboratory, NIMS, Japan).

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлен обзорный спектр КЛ, зарегистрированный на мозаике из нескольких монокристаллов *c*BN, легированных бериллием (далее *c*BN:Be), с секторальной окраской (синий и светло-синий цвета), в котором присутствует две широкие полосы с максимумами при ~ 450 и 300 nm. На этом же рисунке представлен спектр ФЛ в видимой области спектра, зарегистрированный на единичном монокристалле синего цвета. На рис. 1, *b* показаны спектры ФЛ монокристаллов *c*BN темно-синего и темно-желтого цветов, синтезированных

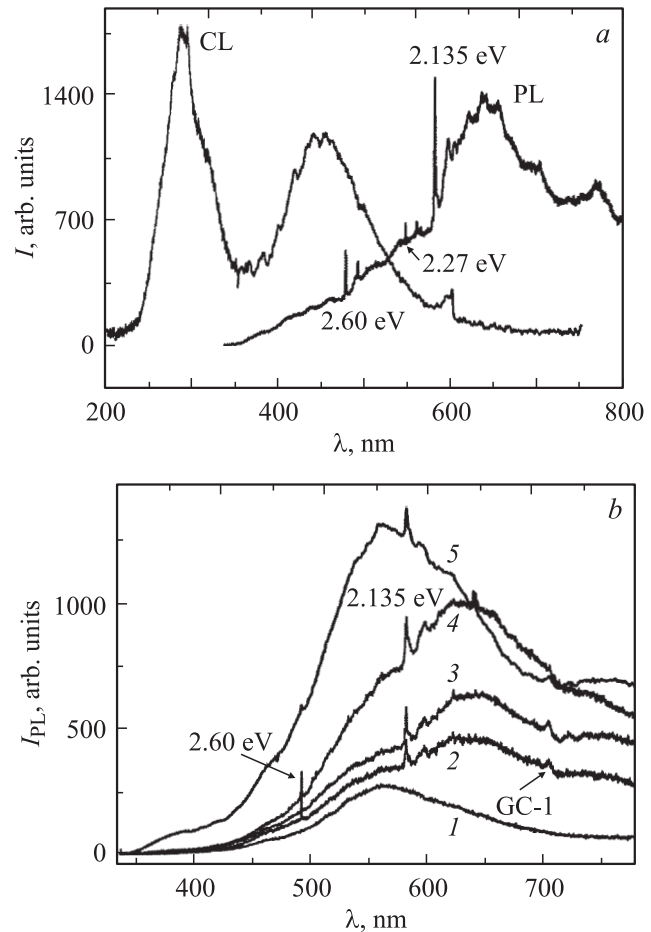


Рис. 1. Спектры КЛ и ФЛ различных монокристаллических образцов *c*BN:Be при 77 К. *a* — КЛ мозаики из нескольких образцов *c*BN с зональной окраской и ФЛ единичного образца синего цвета с БФЛ при 2.60, 2.27 и 2.135 eV; *b* — спектры ФЛ образцов *c*BN синего (1, 5) и желтого (2–4) цветов.

в одной и той же ростовой системе. Спектры ФЛ всех указанных образцов *c*BN:Be представляют собой широкие полосы, максимумы которых существенно сдвинуты в длинноволновую область по сравнению с таковыми в нелегированных образцах *c*BN [18]. Положение максимума полосы в спектрах ФЛ кристаллов синего цвета фиксируется при ~ 560 nm (рис. 1, *b*, кривые 1, 5), а в спектрах желтых кристаллов — при ~ 630 nm (рис. 1, *b*, кривые 2–4). В спектрах желтых кристаллов *c*BN с меньшим содержанием бериллия по сравнению с кристаллами синего цвета [1] присутствует центр люминесценции GC-1, предположительно образованный вакансией азота [18].

На рис. 2, *a* показаны спектры КЛ в УФ-области, зарегистрированные на монокристаллах *c*BN:Be различного цвета: зонально-окрашенных (синий и светло-синий цвета) с содержанием примеси в исходной смеси 0.3 wt.% (кривая 1) и 0.60 wt.% (кривая 2), темно-желтого (кривые 3, 4) и темно-синего цветов (кривые 5, 6). На рис. 2, *b* показаны спектры, зафиксиро-

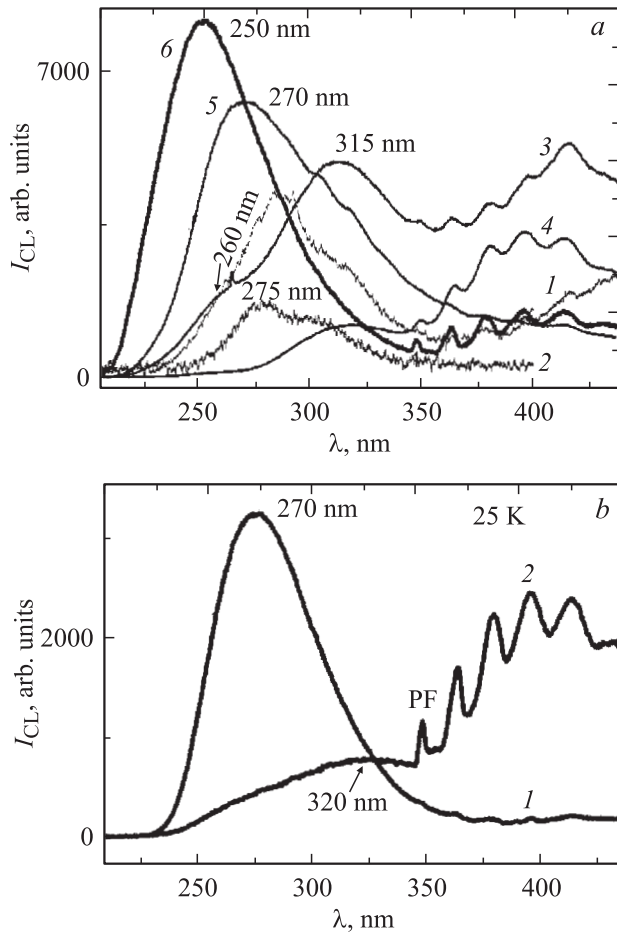


Рис. 2. Спектры КЛ различных монокристаллических образцов $c\text{BN}:\text{Be}$. *a* — мозаики из нескольких образцов $c\text{BN}$ с зональной окраской (1,2), темно-желтого (3,4) и темно-синего (5,6) цветов при 77 К; *b* — в областях синего (1) и желтого (2) цветов единичного образца при 25 К.

ванные в областях темно-синего (кривая 1) и желтого цветов (кривая 2) зонально-окрашенного монокристалла (NIMS, Japan). В спектрах всех упомянутых кристаллов наблюдается широкая полоса, положение максимума которой фиксируется в интервале длин волн от 250 до 315 нм, и центр люминесценции PF со структурированным спектром различной интенсивности [19].

В спектрах ФЛ некоторых кристаллов $c\text{BN}:\text{Be}$ (различного цвета) зарегистрированы неизвестные ранее центры люминесценции с узкими бесфонными линиями (БФЛ). Наиболее интенсивной из БФЛ является линия при 2.135 эВ с полушириной $\Delta = 5$ меВ, менее интенсивными — линии при 2.60 эВ ($\Delta = 4$ меВ) и 2.27 эВ ($\Delta = 1$ меВ).

К настоящему времени можно считать установленными, что по сравнению с алмазом кубический нитрид бора является более сложным объектом для исследований ввиду меньшей эффективности воздействия внешних факторов на его дефектную структуру. Так, облучение $c\text{BN}$ электронами и ионами приводит к

образованию в материале четырех–шести радиационных оптически-активных дефектов: RC-1 (2,3 или 4), С и BN1 [20,21], в то время как в алмазе они регистрируются в большом многообразии. То же касается легирования $c\text{BN}$ во время синтеза под высоким давлением. Указанный факт затрудняет контроль введения дефектов и примесей в $c\text{BN}$ и продвижение материала для использования в практических приложениях.

В настоящей работе установлено, что на $c\text{BN}$ может быть получена интенсивная стабильная примесная люминесценция в глубокой УФ-области спектра ($h\nu \sim 5$ эВ) как отклик на легирование материала бериллием. Спектр люминесценции регистрируется в виде широкой асимметричной полосы шириной более 1 эВ, иногда с видимой структурой, положение максимума которой не остается постоянным от образца к образцу и имеет тенденцию сдвига в коротковолновую область с увеличением в кристаллах содержания бериллия (рис. 2, *a*, кривые 1,2) и, что то же самое, с изменением цвета кристаллов от желтого к синему (рис. 2, *a*, кривые 3–6). Поведение полосы в видимой области спектра легированных кристаллов имеет аналогичную тенденцию (рис. 1, *b*).

С целью исследования природы УФ-полосы в спектре $c\text{BN}:\text{Be}$ нами были изучены зависимости ее интенсивности и возможной структуры, а также положения ее максимума по энергии (в спектре одного из кристаллов) от температуры измерения КЛ в диапазоне 25–297 К (рис. 3, *a*).

Установлено, что с увеличением температуры измерения от 25 до 80–120 К максимум полосы смещается в коротковолновую область спектра на 0.035 эВ, а с последующим ростом температуры до 297 К — в длинноволновую область на 0.060 эВ (рис. 3, *a*, вставка).

Нами был произведен тщательный анализ структуры полосы путем ее разложения на компоненты (гауссианы) в спектрах одного и того же кристалла $c\text{BN}:\text{Be}$, зарегистрированных при различных температурах измерения КЛ. Оптимальным результатом разложения считался вариант, обеспечивающий минимальную ошибку ΔI при совмещении расчетного и экспериментального контуров полос при минимально возможном количестве компонент разложения для данного профиля полосы. Установлено, что полоса с максимумом при ~ 270 нм для всех температур измерения оптимальным образом разлагается на три составляющие полосы с максимумами при ~ 264 , ~ 292 и ~ 312 –330 нм (рис. 4, *a*). Установлено также, что с изменением температуры измерения КЛ в указанном температурном диапазоне наблюдается монотонное перераспределение интенсивностей указанных компонент разложения от первоначального, с доминирующей коротковолновой полосой при $T = 25$ К, в сторону существенного увеличения интенсивностей длинноволновых полос (на вставке к рис. 4, *a* представлен вариант разложения полосы при $T = 200$ К на три компоненты) выше $T = 120$ –160 К. Перераспределение интенсивностей компонент является

таким, что положение максимума результирующей полосы, наблюдаемой в эксперименте, изменяется как показано на вставке рис. 3, а.

На рис. 3, б представлены кривые зависимостей относительной интенсивности каждой из трех полос (в частном случае аппроксимации контура полосы с максимумом при 270 нм тремя гауссианами) в полупологарифмическом масштабе от обратной температуры. На вставке к рисунку отдельно показана кривая изменения интенсивности полосы при 270 нм как целого. На каждой из кривых можно выделить два-три прямолинейных участка. С использованием закона Аррениуса были рассчитаны энергии активации процессов эффективного тушения люминесценции

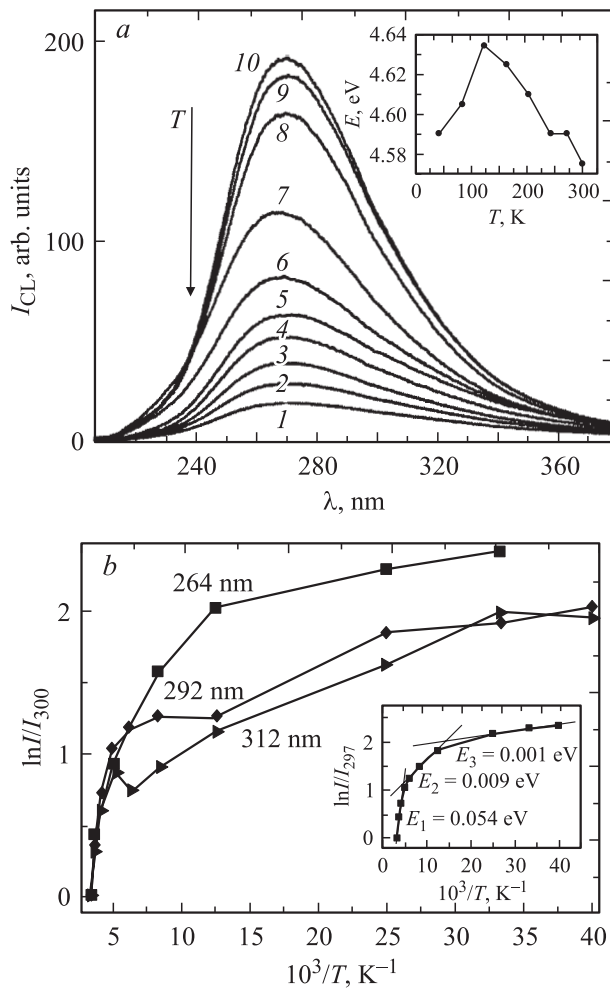


Рис. 3. а) УФ-полоса в спектрах КЛ монокристаллического образца $cBN:Vc$ при различных температурах T , К: 1 — 297, 2 — 270, 3 — 240, 4 — 200, 5 — 160, 6 — 120, 7 — 80, 8 — 40, 9 — 30, 10 — 25. На вставке — зависимость положения максимума полосы от температуры измерения КЛ. б) Зависимости натурального логарифма интенсивностей трех компонент разложения (264, 292, 312 нм) широкой полосы при 270 нм, нормированных на их интенсивности при $T = 300$ К, от обратной температуры. На вставке — то же для суммарной интенсивности широкой полосы 270 нм.

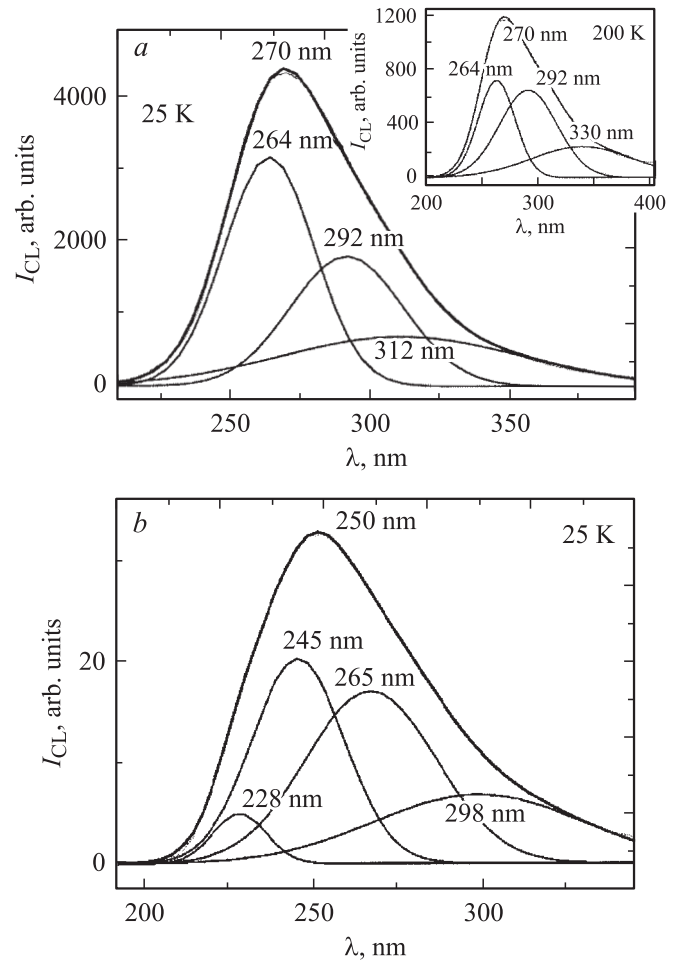


Рис. 4. УФ-полоса в спектрах КЛ монокристаллических образцов $cBN:Vc$ при 25 К, представленная в варианте разложения на составляющие компоненты. а — с максимумом при 270 нм (на вставке — при 200 К); б — с максимумом при 250 нм.

каждой из полос (компонент разложения) в области температур 200–297 К, которые оказались равными: $\Delta E_1 = 0.031$ eV (297–200 К), $\Delta E_2 = 0.053$ (200–80 К) и $\Delta E_3 = 0.045 \pm 0.0005$ (80–25 К) соответственно для полос с максимумами при 265, 290 и 315 нм. Энергия активации тушения люминесценции всех полос при температурах 25–200 К составила 0.002–0.003 eV. Энергия активации тушения аппроксимируемой полосы с максимумом при 270 нм как целого на высокотемпературном участке составила 0.054 eV.

Поведение широкой УФ-полосы в спектре образцов $cBN:Vc$, а именно сдвиг ее максимума в коротковолновую область спектра с ростом температуры измерения выше гелиевой, характерно для рекомбинации на донорно-акцепторных парах [22]. Последующий сдвиг упомянутой полосы в длинноволновую область может быть связан либо с фоновым взаимодействием, активируемом при возрастании температуры измерения [23], либо с изменением заселенности примесных уровней и интенсификацией процессов рекомбинации на далеких

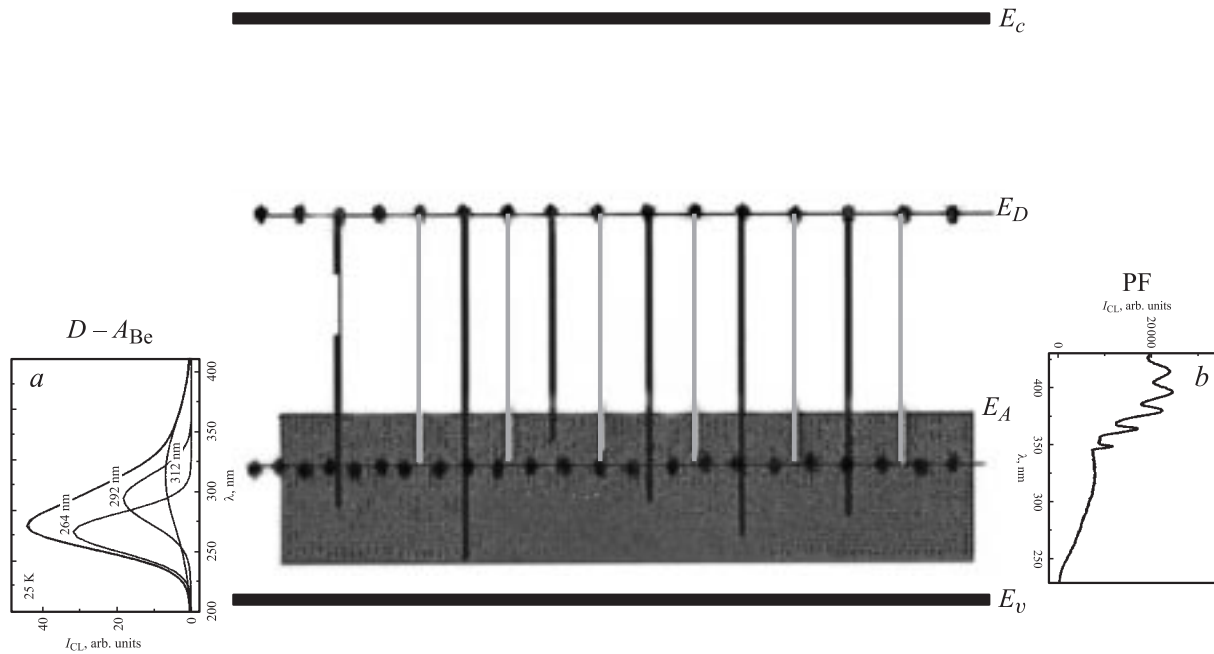


Рис. 5. Предположительная схема запрещенной зоны кубического нитрида бора, легированного бериллием. Показан донорный уровень E_D , электронные переходы с которого на акцепторный уровень E_A формируют в спектре КЛ электронно-колебательную структуру PF, а переходы в зону, состоящую из четырех перекрывающихся подзон акцепторных уровней бериллия (не показаны), — широкую УФ-полосу. Вставка *a* соответствует рис. 4, *a*, на вставке *b* приведены данные, представленные кривой 2 на рис. 2, *b*.

донорно-акцепторных парах. Естественно, что интерпретация природы УФ-полосы в спектре $c\text{BN}:\text{Be}$ в модели рекомбинации на дефектах донорного и акцепторного типов возможна при наличии донорного и акцепторного уровней в запрещенной зоне $c\text{BN}$. В этом случае смещение УФ-полосы в коротковолновую область с возрастанием концентрации бериллия качественно вполне согласуется с уменьшением энергии активации примеси бериллия при увеличении его концентрации в $c\text{BN}$ (зафиксировано ранее при электрических измерениях [9]).

В рамках предложенной модели мы провели предварительную оценку энергии активации донорного уровня в запрещенной зоне $c\text{BN}:\text{Be}$, в спектре КЛ которого наблюдается полоса с максимумом при 270 nm. С использованием [24] получаем, что сумма энергий активации донорного и акцепторного уровней $E_A + E_D = E_g - E_{\text{max}} = 6.4 \text{ eV} - 4.59 \text{ eV} = 1.81 \text{ eV}$, где E_g — ширина запрещенной зоны $c\text{BN}$, E_{max} — энергия, соответствующая максимуму полосы. Тушение люминесценции при температурах выше 200°C со средней энергией активации $\sim 0.054 \text{ eV}$ может быть связано с уходом носителей с донорного уровня в зону проводимости или из валентной зоны на акцепторный уровень. Поскольку в отсутствие бериллия в кубическом нитриде бора электрической проводимости не регистрируется, из самых общих соображений (без учета структуры анализируемой полосы) величина энергии в 0.054 eV должна соответствовать энергетическому зазору между потолком валентной зоны и акцепторным уровнем бериллия в $c\text{BN}$. Поскольку

анализируемая полоса имеет структуру и большую ширину, а энергетический интервал между компонентами ее разложения, узкими полосами, равен теоретически рассчитанному интервалу между разнозарядными акцепторными уровнями бериллия в $c\text{BN}$, можно допустить, что акцепторные уровни Be образуют перекрывающиеся подзоны вблизи потолка валентной зоны со среднесуммарной полушириной $\sim 1 \text{ eV}$. В этом случае величина энергии активации глубокого донорного уровня в схеме переходов уровень–зона может быть приблизительно оценена как $E_D = 1.81 \text{ eV} - E_A \approx 1.75 \text{ eV}$.

Таким образом, наличие структуры полосы, состоящей из 3–4 более узких полос, видимо, подтверждает теоретические представления о том, что бериллий в $c\text{BN}$ формирует несколько акцепторных состояний. Заметим, что в 6H-SiC [25] было обнаружено четыре (из теоретических расчетов известно о пяти) акцепторных уровня, образованных бериллием и его комплексами с энергиями в диапазоне $0.34\text{--}0.73 \text{ eV}$; известно о двух уровнях бериллия в кремнии, Be образует мелкий акцепторный уровень $\Delta E_A = 0.06 \text{ eV}$ в вюрцитном GaN.

Обращает на себя внимание тот факт, что в спектрах КЛ, зарегистрированных в синей и желтой областях одного и того кристалла, наблюдаются соответственно либо интенсивная УФ-полоса, либо центр люминесценции PF. Спектры одноцветных кристаллов могут быть представлены суперпозицией упомянутых особенностей, т.е. одновременно содержат УФ-полосу и структуру PF различной интенсивности. Но чем больше бериллия

в *c*BN, тем менее вероятно наблюдать в его спектре структуру PF. Природа центра PF ранее была интерпретирована в модели рекомбинации на дефектах донорного и акцепторного типов, предположительно имеющих собственную природу [19,26], где доноры — азотные вакансии, а акцепторы — атомы междоузельного бора. С одной стороны процессы рекомбинации с участием дефектов донорного и акцепторного типов, порождающих широкую УФ-полосу в спектрах люминесценции легированного бериллием *c*BN, конкурируют с аналогичными процессами на центрах PF. Это может означать, что первые из упомянутых процессов являются более вероятными. С другой стороны, присутствие бериллия в *c*BN может просто препятствовать образованию одного из дефектов, входящих в состав дефектов PF.

Поскольку бериллий в замещающей бор позиции является акцептором, донорами, участвующими в акте донорно-акцепторной рекомбинации с участием бериллия и одновременно формирующими донорно-акцепторные пары PF, могут быть одни и те же дефекты, а именно вакансии азота. Отметим, что помимо дефектов PF в образцах с большим содержанием бериллия отсутствуют дефекты GC-1, в структуру которых также входят вакансии азота (рис. 1, *b*). Последнее может означать, что большинство азотных вакансий в сильно легированных образцах ассоциируется в донорно-акцепторные пары на основе бериллия. Воспользовавшись формулой из [24] и энергией активации донорного уровня (см. выше), возможно образованного вакансиями азота, мы рассчитали энергию активации акцепторов, с участием которых идут процессы рекомбинации на центрах PF. Она оказалась равной $E_A = E_g - E_{\max} - E_D \approx 1.35$ eV, где $E_{\max} = 3.4$ eV — энергия максимума головной линии структуры PF, а $E_D = 1.75$ eV (см. выше). Из сравнения энергий активации акцепторов, принимающих участие в вышеупомянутых процессах рекомбинации (0.054 и 1.35 eV), ясно, что электронные переходы с одного и того же донорного уровня (вакансии азота, не входящие в состав дефектов GC-1) на мелкие акцепторные уровни бериллия являются более вероятными, чем на более глубокий акцепторный уровень, с участием которого идут процессы рекомбинации на центрах PF. Заметим, что расчеты, проведенные в [12], показали донорную природу азотной вакансии в *c*BN. На рис. 5 мы приводим предположительную схему расположения донорного и акцепторных уровней в ширине запрещенной зоны *c*BN, легированного бериллием.

4. Заключение

Установлена эффективность легирования кубического нитрида бора бериллием со стабильным формированием в спектрах КЛ материала широкой полосы, положение максимума которой с увеличением концентрации примеси смещается в коротковолновую область спек-

тра в интервале длин волн от 250 до 315 nm. При этом образование в кубическом нитриде бора центров люминесценции PF подавляется. По результатам исследований зависимостей структуры, интенсивности и положения максимума полосы от температуры измерения КЛ предложена предварительная интерпретация ее природы в модели рекомбинации на дефектах донорного и акцепторного типов. Выявленная структура полосы, обусловленная суперпозицией из трех-четырёх узких полос с положением максимумов при ~ 225 , ~ 245 , ~ 265 , ~ 295 или ~ 315 nm, а также рассчитанная энергия активации термического тушения люминесценции в максимуме полосы, равная 0,054 eV, позволили сделать предположение о присутствии вблизи валентной зоны легированного бериллием *c*BN нескольких перекрывающихся подзон, возможно связанных с разнозарядными акцепторными уровнями бериллия. Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют контролировать процессы легирования *c*BN бериллием люминесцентными методами, что может представлять научный и практический интерес, а также способствовать продвижению материала к его использованию в практических приложениях.

Список литературы

- [1] E.M. Shishonok, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Haneda, H. Kanda. *Diamond Related Mater.* **12**, 1133 (2003).
- [2] Е.М. Шишонюк. *ЖПС* **71**, 803 (2004).
- [3] K. Era, O. Mishima. *Mat. Res. Symp. Proc.* **162**, 556 (1990).
- [4] E.M. Shishonok, J.W. Steeds. *Abstracts Int. Conf. „Doping issues in wide band-gap semiconductors“*. Exeter, U.K. (2001). P. 7.
- [5] Н.Д. Тяпкина, М.М. Кривополенова, В.С. Вавилов. *ФТТ* **6**, 2192 (1964).
- [6] J.B. Robertson, R.K. Franks. *Solid State Commun.* **6**, 625 (1967).
- [7] J.B. Robertson. *Bull. Am. Phys. Soc.* **13**, A 1475 (1968).
- [8] R.K. Franks, J.B. Robertson. *Solid State Commun.* **6**, 479 (1967).
- [9] T. Taniguchi, J. Tanaka, O. Mishima, T. Ohsawa, S. Yamaoka. *Diamond Related Mater.* **2**, 1473 (1993).
- [10] L.M. Gameza. *High Press. Res.* **18**, 373 (2000).
- [11] P. Piquini, R. Mota, T. Schmidt, A. Fazzio. *Phys. Rev. B* **56**, 3556 (1997).
- [12] V.A. Gubanov, Z.W. Lu, B.M. Klein, C.Y. Fong. *Phys. Rev. B* **53**, 4377 (1996).
- [13] I.A. Huward. *Solid State Commun.* **99**, 697 (1996).
- [14] L.P. Castineira, T.R. Leite, J.L.F. Silva, L.M.R. Scolfard, J.L.A. Alves, H.W.L. Alves. *Phys. Stat. Sol. (b)* **210**, 401 (1998).
- [15] I. Gorczyca, A. Svane, N.E. Christiansen. *Nitride Semiconductor Res. Internet journal.* **3**, article 48 (1998).
- [16] W. Hayes, A. Spray. *Proc. Int. Conf. „Localized excitation in solids“*. N. Y. (1968). P. 140.
- [17] B. Clerjaud, D. Cfte, C. Naud, R. Bouanani-Rahbi, D. Wasik, T. Suski, E. Litwin-Staszewska, M. Bockowski, I. Grzrgory. *Abstracts Int. Conf. „Doping issues in wide band-gap semiconductors“*. Exeter, U.K. (2001). P. 4.

- [18] Е.М. Шишонов, В.Б. Шипило, А.М. Зайцев, Н.Г. Аниченко. Изв. АН СССР. Неорган. материалы **26**, 1651 (1990).
- [19] Е.М. Шишонов, В.Б. Шипило, А.И. Лукомский. ЖПС **53**, 552 (1990).
- [20] A.M. Zaitsev, A.A. Melnikov, E.M. Shishonok, V.B. Shipilo. Phys. Stat. Sol. (a) **94**, 125 (1985).
- [21] E.M. Shishonok, J.W. Steeds. Diamond Related Mater. **11**, 1774 (2002).
- [22] S.J. Chung, O.H. Cha, C.-H. Hong, E.-K. Suh, V.H. Kim. J. Corea Phys. Soc. **37**, 1003 (2000).
- [23] Ж. Панков. Оптические процессы в полупроводниках. М. (1973). 456 с.
- [24] N.M. Gasanly, A. Serpenguzel, A. Audini, O. Gurtu, I. Yilmaz. J. Appl. Phys. **85**, 3198 (1999).
- [25] X.D. Chen, C.C. Ling, S. Fung, C.D. Beling, M. Gong, T. Henkel, H. Tanoue, N. Kobajashi. J. Appl. Phys. **93**, 3117 (2003).
- [26] Е.М. Шишонов, Дж. Стилс. ЖПС **70**, 651 (2003).