

Смещение спектров электролюминесценции структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ с различным содержанием индия и различным материалом подложки, обусловленное эффектом Штарка и механическими напряжениями

© В.П. Велещук[¶], А.И. Власенко, М.П. Киселюк, З.К. Власенко, Д.Н. Хмель, В.В. Борщ⁺

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03680 Киев, Украина

⁺ Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, 36011 Полтава, Украина

(Получена 25 ноября 2014 г. Принята к печати 11 декабря 2014 г.)

В работе измерено смещение между максимумами спектров электролюминесценции структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ при прямом и обратном напряжении в зависимости от содержания индия x в квантовой яме и от материала подложки — SiC, AuSn/Si, Al_2O_3 . Установлено, что данное смещение увеличивается с ростом концентрации индия в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и механических напряжений от подложки.

1. Введение

Для различных применений в оптоэлектронике, предполагающих подсветку и освещение, важно прогнозирование спектров электролюминесценции (ЭЛ) светодиодов (СД) InGaN/GaN , получения излучения в определенном наперед заданном спектральном диапазоне и его варьирование в широких пределах. Это достигается изменением толщины и содержания In в квантовых ямах (КЯ) InGaN .

На практике, однако, точного соответствия длины волны излучения содержанию In в КЯ не наблюдается. Для типичных светодиодных структур сдвиг в длинноволновый диапазон может составлять вплоть до нескольких десятков нанометров. Причинами могут быть внутренние механические напряжения и их градиент, пространственные флуктуации концентрации In, его сегрегация и особенно наличие пьезоэлектрической и спонтанной поляризации в нитридах [1–8]. Рассогласование параметров кристаллической решетки между слоями InGaN и GaN , а также между GaN и подложкой приводит к возникновению значительных механических напряжений. Из-за таких напряжений и спонтанной поляризации в КЯ InGaN существует большое суммарное встроенное поляризационное поле, что ведет к красному смещению спектра за счет квантово-размерного эффекта Штарка (КРЭШ) [1–6].

При приложении обратного напряжения возможна компенсация суммарного встроенного электрического поля, и тогда спектр ЭЛ не смещается [2,6,8,9], при этом излучение имеет микроплазменный характер по поверхности [9–12]. Спектры микроплазм (МП) СД InGaN/GaN несут дополнительную информацию об оптических свойствах гетероструктуры [9–12], особенно о ее дефектах. Несмотря на интенсивные теоретические исследования эффектов, обусловленных спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями в нитридных соединениях [1–5,7], экспериментальных данных о закономерностях и величи-

нах смещения спектров в гетероструктурах InGaN/GaN за счет КРЭШ на сегодня недостаточно.

Поэтому целью данной работы является исследование спектров излучения гетероструктур InGaN/GaN мощных СД с различным содержанием индия в КЯ и на разных подложках при обратном и прямом напряжении.

2. Эксперимент

Исследовались структуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ мощных светодиодов (мощность $P_{el} = 1$ Вт, номинальный ток $I_{nom} = 350$ мА, площадь гетероструктур 1 мм^2) с различным содержанием индия в квантовой яме, $x = 0.05, 0.15, 0.2$ и 0.3 , на подложке SiC. Исследовались также структура на подложке Al_2O_3 и структура ($x = 0.2$), выращенная на сапфировой подложке и перенесенная после лазерного отделения (процесс laser lift off [13]) на Si-подложку с помощью AuSn-контакта (эвтектика). На рис. 1 показаны расположение и параметры слоев гетероструктур. Номинальная толщина квантовой ямы была одинаковой и равнялась 30 \AA . В таблице приведены плотность дислокаций и световой поток от структур. Эти параметры позволяют оценить качество структур.

Спектры электролюминесценции МП имели очень малую интенсивность и измерялись спектрометрическим НААС-2000 (Everfine) с большим временем интегрирования для четкого выявления линий спектра, время измерения спектров составляло 5 или 10 мин.

Плотность дислокаций и световой поток от структур при токе 350 мА

Параметр	Подложка		
	SiC	AuSn/Si (после отделения от Al_2O_3)	Al_2O_3
Плотность дислокаций, см^{-2}	$\sim 10^7$	$\sim 10^9$	$\sim 10^9$
Световой поток, лм	30.6	21	15

[¶] E-mail: vvvit@ukr.net

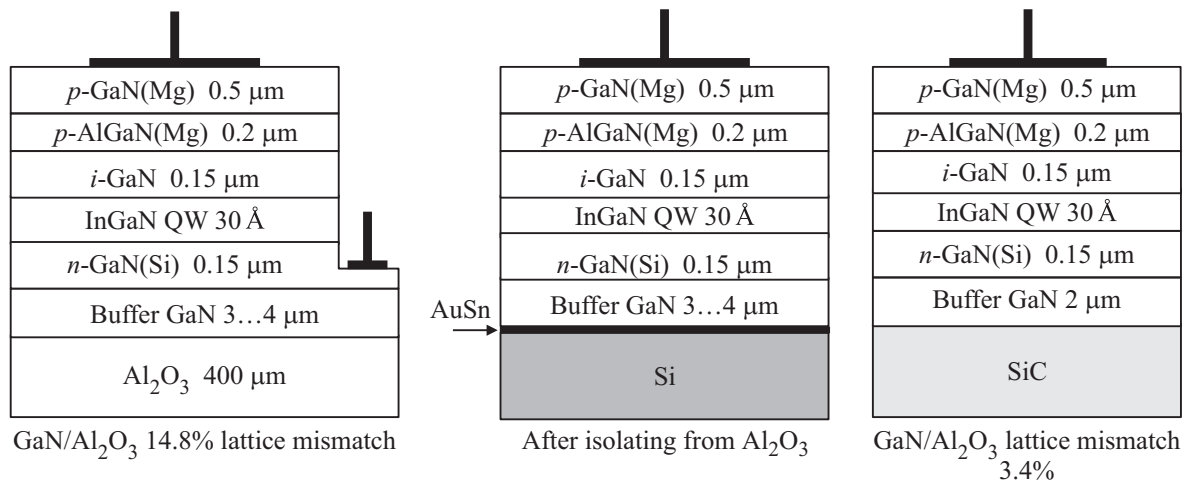


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктур InGaN/GaN мощных светодиодов.

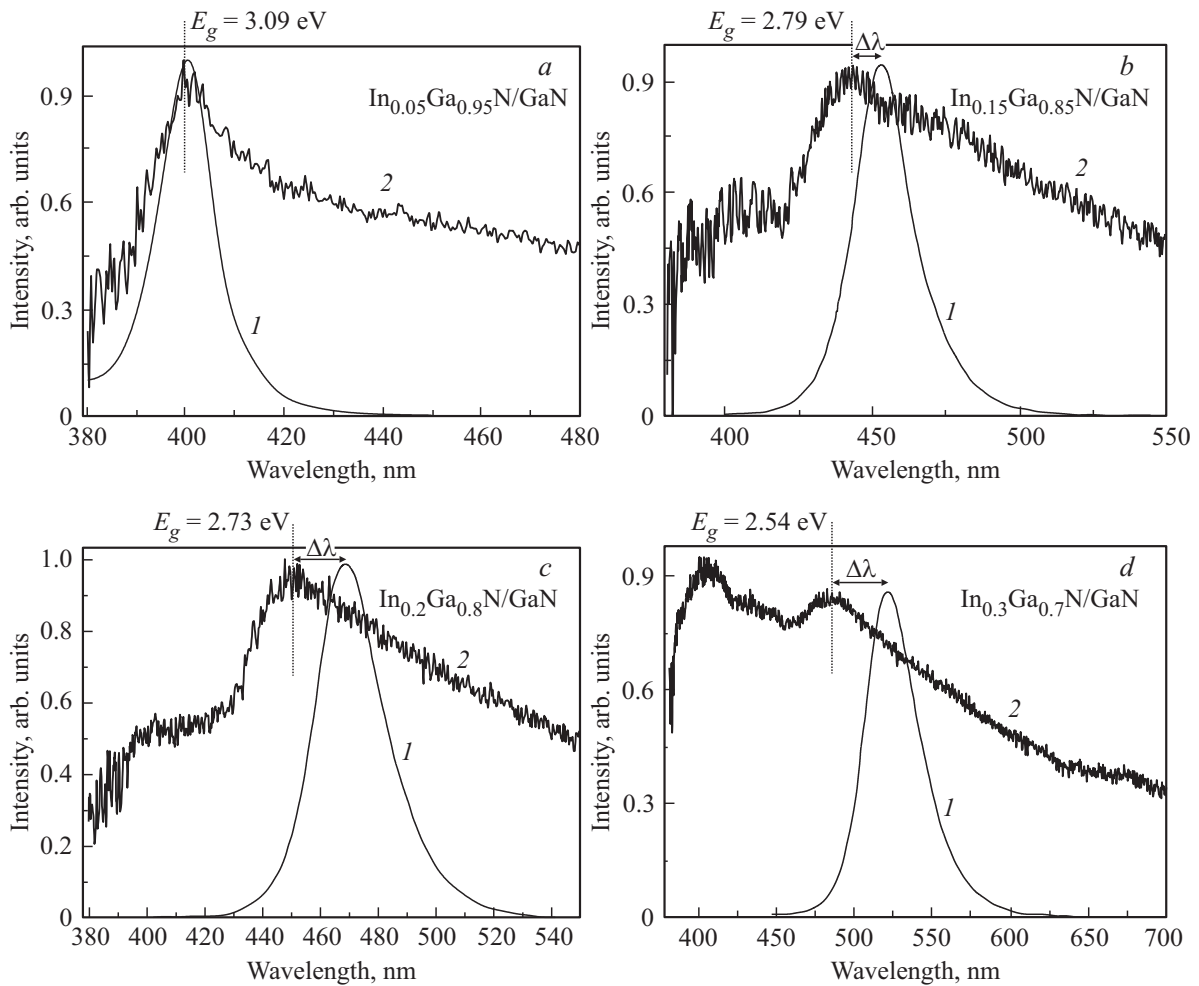


Рис. 2. Спектры электролюминесценции структур $In_xGa_{1-x}N/GaN$ с различным содержанием индия x в квантовой яме при прямом (1) и обратном (2) смещении. Подложка SiC. $U_{rev} = -23$ (a), -40 В (b-d).

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены спектры ЭЛ структур на подложке SiC при прямом и обратном напряжении с различным

содержанием индия в квантовой яме. При прямом напряжении ток имел номинальное значение 350 мА. Обратное напряжение составляло $U_{rev} = -40$ В, а для структуры с $x = 0.05$ (длина волны максимума $\lambda_{peak} = 400$ нм)

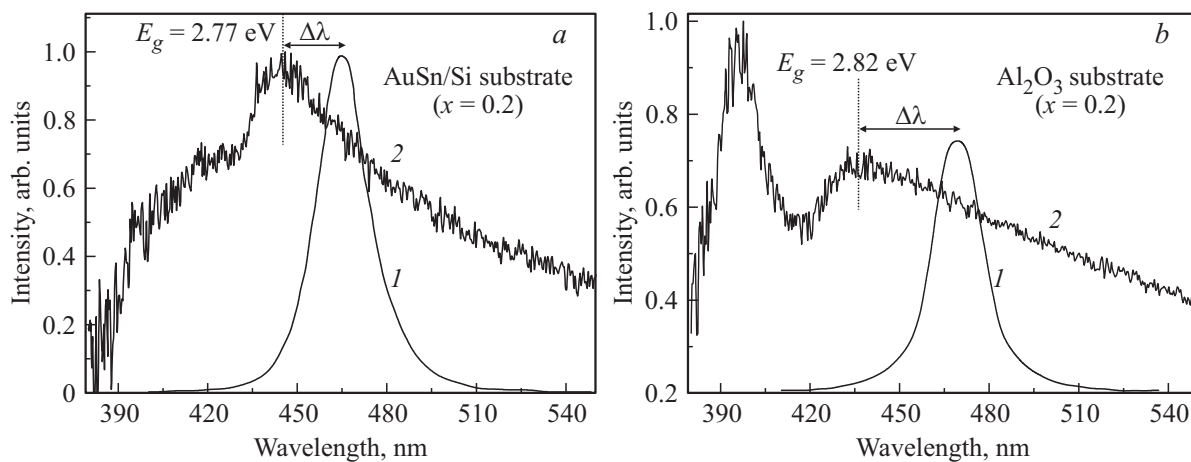


Рис. 3. Спектры электролюминесценции структур $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ на различных подложках при прямом (1) и обратном (2) смещении. $U_{\text{rev}} = -40$ (a), -24 В (b).

$U_{\text{rev}} = -23$ В, поскольку уже при -26 В может происходить пробой при выдержке до 15 мин.

В спектре МП присутствует основной пик КЯ, максимум которого соответствует энергии запрещенной зоны (E_g) InGaN , и плечо при 400 нм (рис. 2, b, c) или пик (рис. 2, d) прилегающих к КЯ слоев GaN . Плечо в области 390–430 нм соответствует рекомбинации на донорах и (или) акцепторах в слоях p - и n - GaN , при этом для структуры $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ (рис. 2, d) и для структуры на сапфировой подложке (рис. 3, b) вместо плеча присутствует пик при 400 нм, интенсивность которого превышает пик от КЯ. Это указывает на большую концентрацию донорных и акцепторных состояний, связанных также и с дефектами на гетерограницах, поскольку большое содержание индия ($x = 0.3$), равно как и сапфировая подложка, ведут к большому рассогласованию решеток на гетерограницах и соответственно большей концентрации дефектов (см. таблицу).

Видно, что между пиком ЭЛ при номинальном токе и пиком КЯ при обратном напряжении существует смещение (интервал) $\Delta\lambda$, которое увеличивается с ростом содержания индия x . Для СД, излучающего на длине волны 400 нм, $\Delta\lambda = 0$, а для СД, излучающего на длине волны 520 нм (зеленое излучение), $\Delta\lambda$ максимально и составляет 36 нм. При этом в работах [9,10] для светодиода зеленого излучения InGaN/GaN ($\lambda_{\text{peak}} = 525$ нм), но на сапфировой подложке, данное смещение $\Delta\lambda = 45$ нм.

В дополнение к рис. 2, c на рис. 3 приведены спектры ЭЛ при прямом и обратном напряжении структур $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ на подложке AuSn/Si и на сапфировой подложке. Здесь также при прямом напряжении ток равен 350 мА, обратное напряжение равно -40 (a) и -24 В (b), поскольку для СД на подложке Al_2O_3 при повышении величины обратного напряжения > 30 В может происходить пробой из-за большей концентрации протяженных и точечных дефектов.

Видно, что для структуры $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ величина смещения $\Delta\lambda$ минимальна в случае подложки SiC

(рис. 2, c) и максимальна в случае подложки Al_2O_3 (рис. 3, b).

Энергия пика электролюминесценции микроплазм КЯ InGaN для структуры на подложке SiC равна $E_g = 2.73$ эВ, для структуры на подложке AuSn/Si $E_g = 2.77$ эВ, на Al_2O_3 — 2.82 эВ. Видно, что E_g увеличивается, что связано с увеличением внутренних механических напряжений в буферном слое GaN и слое InGaN .

Спектры при прямом напряжении (номинальном токе) измерялись при одинаковой температуре, что обеспечивалось одинаковым теплоотводом на медном массивном радиаторе, и, таким образом, пик спектра не был дополнительно смещен в длинноволновую область за счет самонагрева СД. Нами установлено, что для данных гетероструктур в диапазоне обратных напряжений от начала свечения МП (-18 В) до -50 В смещение пика КЯ отсутствует [12]. Отсутствие смещения при увеличении напряжения в нашем случае объясняется, возможно, компенсацией коротковолнового смещения за счет уменьшения суммарного поля [6] длинноволновым смещением вследствие сужения ширины запрещенной зоны при повышении температуры в локальных дефектных областях.

На рис. 4 приведены зависимости смещения $\Delta\lambda$ от содержания индия x и материала подложки согласно рис. 2 и 3: $\Delta\lambda = 0$, 9 нм (53 мэВ), 18 нм (104 мэВ), 36 нм (176 мэВ) для $x = 0.05, 0.15, 0.2, 0.3$ соответственно; при $x = 0.2$ $\Delta\lambda = 20$ нм (120 мэВ) для подложки AuSn/Si и 34 нм (200 мэВ) для подложки Al_2O_3 .

Теоретически при увеличении x от 0.05 к 0.3 суммарное пьезоэлектрическое поле внутри КЯ возрастет практически линейно [1–3], этому и соответствует зависимость $\Delta\lambda(x)$ на рис. 4. Что касается зависимости $\Delta\lambda$ от материала подложки, то буферный слой GaN на подложке SiC находится в состоянии растяжения, деформация $\varepsilon(\text{GaN/SiC}) > 0$, а на подложке Al_2O_3 — в состоянии сжатия, $\varepsilon(\text{GaN/Al}_2\text{O}_3) < 0$, в плоскости роста, причем

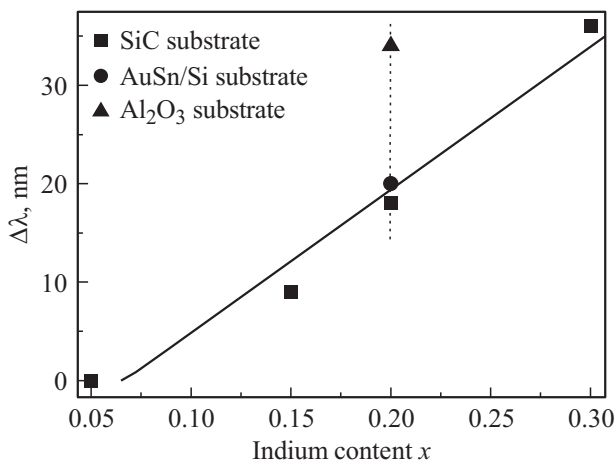


Рис. 4. Зависимость величины смещения $\Delta\lambda$ от содержания индия и от материала подложки (согласно рис. 2 и 3).

$|\varepsilon(\text{GaN}/\text{SiC})| < |\varepsilon(\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3)|$, рассогласование решеток составляет 3.4 и 14.8% соответственно. Поэтому смещение практически в 2 раза больше для структуры на сапфировой подложке. При лазерном отслоении структуры с сапфировой подложки согласно методике [13] и перенесении ее на Si-подложку с промежуточным слоем эвтектики AuSn часть напряжений снимается, и смещение уменьшается от 34 до 20 нм, т.е. близко к значению $\Delta\lambda$ для структуры $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}/\text{SiC}$ (рис. 4).

В работе [4] теоретически рассчитанное максимальное смещение пика спектра ЭЛ в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ толщиной 3 нм за счет КРЭШ составляет 8, 25, 58.5 нм для $x = 0.1, 0.2, 0.3$ соответственно. В работе [2] рассчитанное смещение пика для такой структуры составляет $\Delta E = 0.23\text{--}0.25, 0.33\text{--}0.37, 0.43\text{--}0.49, 0.53\text{--}0.62$ эВ для $x = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$, т.е. приблизительно от 34 до 93 нм для интервала $x = 0.1\text{--}0.25$. В работе [5] смещение пика фотолюминесценции для $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (выращен в условиях обогащения Al) за счет КРЭШ составляет 150 мэВ (12 нм).

Таким образом, полученные нами экспериментальные значения $\Delta\lambda$ занижены в сравнении с теоретическими [2,4]. Согласно [1,2,5], это можно объяснить экранировкой электрического поля в реальной структуре свободными носителями и заряженными примесями. Кроме того, величина электрической поляризации в КЯ InGaN (гетероструктура AlGaN/GaN/InGaN/GaN/подложка) с сильными модуляциями состава и протяженными дефектами может отличаться от расчетной за счет отличия поля упругих деформаций [5]. Векторы пьезоэлектрической и спонтанной поляризации в этом случае могут быть направлены не параллельно оси [0001], а их величина и направление могут меняться случайным образом, отражая флуктуации состава твердого раствора [5].

Электрическое поле внутри КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ возрастает с концентрацией индия и при $x = 0.4$ дости-

гает 3–4 МэВ/см [1–3], а для КЯ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$ равно 0.55 МэВ/см [1,3], т.е. достаточно для проявления КРЭШ. Отсутствие смещения для гетероструктуры $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$ ($\lambda_{\text{peak}} = 400$ нм) в нашем случае, возможно, объясняется поверхностной сегрегацией индия, которая преобладает при малом содержании индия в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, что приводит к „синему“ сдвигу энергии перехода (70 мэВ для длины сегрегации 1 нм на каждом гетероинтерфейсе) [14].

По нашим расчетам согласно данным [1–4] для модельной структуры GaN/InGaN/GaN величина поляризации за счет подложки существенна и соизмерима с величинами спонтанной (P_{SP}) и пьезоэлектрической (P_{PZ}) поляризации: значения $P_{\text{SP}}(\text{InGaN})$, $P_{\text{PZ}}(\text{InGaN}/\text{GaN})$, $P_{\text{PZ}}(\text{GaN}/\text{SiC})$ соизмеримы. По модулю $|P_{\text{PZ}}(\text{InGaN}/\text{GaN})| = 0.0076$ ($x = 0.5$), 0.023 ($x = 0.15$), 0.0237 ($x = 0.2$), 0.036 ($x = 0.3$); $|P_{\text{SP}}(\text{InGaN})| = 0.0326$ ($x = 0.5$), 0.0304 ($x = 0.15$), 0.0295 ($x = 0.2$), 0.0284 ($x = 0.3$); $|P_{\text{PZ}}(\text{GaN}/\text{SiC})| = 0.045$. Величина суммарной поляризации в КЯ с учетом деформации от подложки $P = P_{\text{SP}}(\text{InGaN}) + P_{\text{PZ}}(\text{InGaN}/\text{GaN}) + P_{\text{PZ}}(\text{GaN}/\text{SiC})$ составляет $-0.015, 0.00052, 0.0088, 0.027$ (Кл/м²) для $x = 0.05, 0.15, 0.2, 0.3$, т.е. возрастает с ростом x . При этом величины $P_{\text{SP}}(\text{InGaN})$ и $P_{\text{PZ}}(\text{InGaN}/\text{GaN})$ очень близки (для $x = 0.15\text{--}0.3$), но их вектора антипараллельны. Таким образом, вклад в смещение пика $\Delta\lambda$ дают все вышеперечисленные причины поляризации.

Здесь важно отметить, что пьезоэлектрическая поляризация определяется в первую очередь механическими напряжениями, а спонтанная поляризация — внутренней асимметрией в связях кристалла при равновесии, т.е. в нашем случае существует зависимость смещения $\Delta\lambda$ от напряжений.

4. Заключение

Смещение между максимумами спектров электролюминесценции структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ мощных светодиодов при прямом и обратном напряжении обусловлено квантово-размерным эффектом Штарка и зависит как от содержания индия x в квантовой яме, так и от материала подложки — SiC, AuSn/Si, Al_2O_3 . Экспериментально определены величины данных смещений.

В структурах InGaN/GaN на одинаковых подложках (SiC) смещение между максимумами спектров электролюминесценции при прямом и обратном напряжении возрастает с величиной концентрации In и с величиной напряжений в квантовой яме.

В структурах InGaN/GaN на различных подложках (SiC, AuSn/Si, Al_2O_3) при неизменном составе квантовой ямы возрастают как ширина запрещенной зоны InGaN, так и смещение между максимумами спектров электролюминесценции при прямом и обратном напряжении при увеличении деформации на границе подложка/буферный слой.

Список литературы

- [1] C. Wood, D. Jena. *Polarization Effects in Semiconductors. From Ab Initio Theory to Device Applications* (N.Y.–London, Springer, 2008).
- [2] Ursula M.E. Christmas, A.D. Andreev, D.A. Faux. *J. Appl. Phys.*, **98**, 073 522 (2005).
- [3] L. Guo, X.W. Hongling Xiao, B. Wang. *J. Cryst. Growth*, **298**, 522 (2007).
- [4] S. Morawiec, R.P. Sarzała, W. Nakwaski. *Appl. Phys. A*, **113**, 801 (2013).
- [5] Е.А. Шевченко, В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, А.А. Ситникова, С.В. Иванов, А.А. Торопов. *ФТП*, **46**, 1022 (2012).
- [6] H.-S. Chen, Z. H. Liu, P.-Y. Shih, C.-Y. Su, C.-Y. Chen et al. *Opt. Express*, **22**, 8367 (2014).
- [7] И.А. Супрядкина, К.К. Абгарян, Д.И. Бажанов, И.В. Мутигуллин. *ФТП*, **47**, 1647 (2013).
- [8] Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, В.А. Зыков, В.Г. Сидоров. *Широкозонные полупроводники* (СПб., Наука, 2001).
- [9] M. Meneghini, N. Trivellin, M. Pavesi, M. Manfredi, U. Zehnder, B. Hahn, G. Meneghesso, E. Zanoni. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 173 507 (2009).
- [10] M. Meneghini, S. Vaccari, N. Trivellin, Z. Dandan, C. Humphreys, R. Butendheich, C. Leirer, B. Hahn, G. Meneghesso, E. Zanoni. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **59** (5), 1416 (2012).
- [11] А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Э. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. *ФТП*, **32**, 63 (1998).
- [12] В.П. Велешук, А.И. Власенко, М.П. Киселюк, О.В. Ляшенко. *ЖПС*, **80** (1), 121 (2013).
- [13] V. Haerle, B. Hahn, S. Kaiser, A. Weimar, S. Bader, F. Eberhard, A. Plössl, D. Eisert. *Phys. Status Solidi A*, **201**, 2736 (2004).
- [14] M.V. Klymenko, S.I. Petrov, O.V. Shulika. *Photoelectron.*, **19**, 125 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

Caused by the Stark effect and strains the shift of the electroluminescence spectrums of $In_xGa_{1-x}N/GaN$ structures with different indium content and different substrate material

V.P. Veleschuk, A.I. Vlasenko, M.P. Kisselyuk,
Z.K. Vlasenko, D.N. Khmil', V.V. Borshch⁺

Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03680 Kyiv, Ukraine

⁺ Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University,
36011 Poltava, Ukraine

Abstract In the paper the shift between the maximums of electroluminescence spectrums of $In_xGa_{1-x}N/GaN$ structures was measured at forward and reverse voltage depending both on the indium content x in quantum well and on the substrate — SiC, AuSn/Si, Al_2O_3 . It was determined that this shift increased both with growth of the indium concentration in the $In_xGa_{1-x}N$ layer and with increase of the substrate-induced strains.