



УКРАЇНА

(19) UA (11) 94699 (13) C2
(51) МПК (2011.01)
C30B 19/00
C30B 29/00
H01L 21/20 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ ВИРОЩУВАННЯ ЕПІТАКСІЙНИХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР З МАСИВАМИ КВАНТОВИХ ТОЧОК

1

(21) а200705813

(22) 24.05.2007

(24) 10.06.2011

(46) 10.06.2011, Бюл.№ 11, 2011 р.

(72) МАРОНЧУК ІГОР ЄВГЕНОВИЧ, КУЛЮТКІНА ТАМАРА ФАТИХІВНА, МАРОНЧУК ІГОР ІГОРОВИЧ

(73) МАРОНЧУК ІГОР ЄВГЕНОВИЧ, КУЛЮТКІНА ТАМАРА ФАТИХІВНА, МАРОНЧУК ІГОР ІГОРОВИЧ

(56) US 20070089668, 26.04.2007, A1

UA 62235, 15.12.2003, A

Выращивание гетероструктур GaSb/InAs жидкофазной эпитаксией без растворения подложки. Марончук И. Е., Курак В. В., Андропова Е. В., Баганов Е. А. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003, №6

Использование метода импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава для формирования наноразмерных структур InSb в матрице GaSb. Марончук И.Е., Андропова Е.В., Баганов Е.А., Курак В.В. ААЭКС, №1(11), 2003, Современные технические средства, комплексы и системы И.Е.Марончук, А.И.Марончук, Т.Ф.Кулюткина, М.В.Найденкова, И.В.Чорный // Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2005, № 12.-С. 95-99

(57) 1. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок, що включає нагрів до температури T_1 монокристалічної підкладки і насичених розчинів заданого складу, приведення лицевої поверхні підкладки в контакт з розчином для вирощування квантових точок, а тильної поверхні підкладки - в контакт з теплопоглиначем, що має температуру T_p , який на лицевій поверхні підкладки створює імпульс охолодження $\Delta T_p = T_1 - T_p$, для формування масиву квантових точок на поверхні нанорозмірного "змочувального" шару, що утворюють, приведення лицевої поверхні підкладки при температурі T_1 в

2

контакт з розчином для вирощування спейсерних шарів, постійна ґрати матеріалу яких співпадає з постійними ґрат матеріалу підкладки, а тильної поверхні підкладки в контакт з теплопоглиначем, що має температуру T_p , створюючи на лицевій поверхні підкладки імпульс охолодження для формування спейсерного шару, що покриває масив квантових точок, багаторазне повторення вирощування масивів квантових точок і що покривають їх спейсерних шарів, товщина яких забезпечує тунельний перехід носіїв заряду, приводить до створення багат шарових наногетероструктур з вертикально-зв'язаними квантовими точками, який відрізняється тим, що після вирощування масиву квантових точок тильну поверхню підкладки приводять в контакт з теплонагрівачем, температура якого T_n , завдяки чому на лицевій поверхні підкладки створюють імпульс тепла $\Delta T_n = T_n - T_1$ для розчинення частини вирощуваного "змочувального" шару між квантовими точками й областей з'єднання квантових точок в островках, причому величина імпульсу тепла $|\Delta T_n| = (0,3 - 0,7) |\Delta T_p|$.

2. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок за п. 1, який відрізняється тим, що здійснюють вирощування багаторазним повторенням формування масивів квантових точок з розчиною частиною «змочувального» шару між ними і покриваючих їх спейсерних шарів, товщина яких дозволяє здійснювати тунельний перехід носіїв заряду вертикально-зв'язаним квантовим точкам, завдяки чому формують багат шарові наногетероструктури, а перенесення носіїв заряду в яких здійснюють між квантовими точками по каналах, утворених з розчиненої частини "змочувальних" шарів.

3. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок за п. 1, який відрізняється тим, що здійснюють додатково послідовну зміну складу розчинів для вирощування спейсерних шарів, що приводить до формування квазіелектричного поля, яке тягне, і ефективно переносить носії заряду з області їх генерації до

(13) C2

(11) 94699

(19) UA

поверхонь наногетероструктури в проміжках між вертикально незв'язаними квантовими точками, а саме квазіелектричне поле, що тягне носії заряду, що обумовлено направленими послідовними змінами ширини забороненої зони спейсерних шарів.

4. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок за п. 1, який **відрізняється** тим, що додатково здійснюють послідовну зміну складу розчинів для вирощування квантових точок, що приводить до формування

масивів квантових точок, розміри яких змінюються по товщині багат шарової наногетероструктури.

5. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок за п. 1, який **відрізняється** тим, що використовують монокристалічну підкладку з матеріалу, постійна ґрати якого відрізняється від постійних ґрат матеріалу спейсерного шару менше ніж 1 %, завдяки чому одержують багат шарові епітаксійні наногетероструктури з квантовими точками, що виготовляють з зниженням вартості без погіршення їх характеристик.

Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок при імпульсній зміні температури підкладки заснований на процесах кристалізації та розчинення твердого тіла в рідкій або газовій фазі. Винахід належить до нанотехнології та може бути використаний для отримання різноманітних напівпровідникових епітаксійних гетероструктур з масивами квантових точок. Епітаксійні наногетероструктури з масивами квантових точок належать до нанорозмірних утворень, які формуються на монокристалічній підкладці напівпровідникового матеріалу, як правило, широкозонного, з вирощенням на ній буферним шаром того ж матеріалу з масивів квантових точок іншого вузькозонного матеріалу, що розділені нанорозмірними шарами матричного широкозонного матеріалу.

Відомий спосіб отримання епітаксійних шарів A^3B^5 (А. с. SU 1566807 А1, МПК C30B19/04, 29/40, пріоритет з 1988 р.) - аналог, який включає нагрів розчину-розплаву до температури насичення, приведення його в контакт з робочою поверхнею підкладки, що нагріта до тієї ж температури, приведення поверхні підкладки, протилежної робочій, в контакт з теплопоглиначем, при визначених умовах та проведення кристалізації до досягнення різниці температур між теплопоглиначем та розчином-розплавом не більше 0,25 °С. Проте цей спосіб не дозволяє отримати епітаксійні структури з квантовими точками. Як зазначалось в прикладах реалізації способу та даних, що представлені в таблицях, в цьому процесі отримуються нанорозмірні суцільні, з гладкою поверхнею, епітаксійні шари з розкидом товщини не менше 5 %.

Відомий спосіб отримання епітаксійних гетероструктур на основі GaAs з масивом квантових точок InAs в режимі зростання Странського-Крастанового методом молекулярно-пучкової епітаксії [В. Г. Дубровский, В. А. Егоров, Г. Э. Цырлин. Теоретические и экспериментальные исследования влияния скорости роста InAs на свойства ансамблей квантовых точек в системе InAs/GaAs // ФТП, 2003, том 37, вып. 7, с. 113-119] - аналог. Формуванню масиву квантових точок передують утворення так званого «змочувального» шару InAs, на поверхні якого потім відбувається вирощування масиву квантових точок InAs. В «змочувальних» шарах InAs, в зв'язку з відмінністю в розмірах постійних решіток InAs та GaAs, утворюються великі механічні напруги. За наявності таких «змочувальних» шарів в області p-n пе-

реходу в електронних приладах, виникають значні рекомбінаційно-генераційні струми, що значно знижують характеристики цих електронних приладів.

Так, в роботі [A. G. Norman, M. C. Hanna, P. Dippo, D. H. Levi, R. C. Reedy, J. S. Ward, and M.M. Al-Jassim. InGaAs/GaAs QD Superlattices: MOVPE Growth, Structural and Optical Characterization, and Application in Intermediate-Band Solar Cells: Proc. of 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conf. and Exhibition. - Lake Buena Vista, Florida, January 3-7, 2005, pp 1-6] показано, що характеристики сонячних елементів, що містять в собі масиви квантових точок в області p-n переходу, зі збільшенням кількості шарів цих масивів квантових точок значно погіршуються: сонячний елемент, що не містить масиви квантових точок в області p-n переходу мав напругу $U_{xx} = 0,95$ В та $I_{kz} = 20$ мА/см², якщо сонячний елемент містив 25 шарів масивів квантових точок в області p-n переходу, то він мав $U_{xx} = 0,55$ В і $I_{kz} = 12$ мА/см², а при 50 шарах масивів квантових точок InAs він мав $U_{xx} = 0,45$ В і $I_{kz} = 12$ мА/см². Автори роботи стверджують, що погіршення характеристик сонячних елементів при збільшенні кількості шарів, що містять квантові точки в області p-n переходу, обумовлено рекомбінаційно-генераційними струмами, що виникають в «змочувальних» шарах InAs при проходженні носіїв току через p-n перехід.

Відомий спосіб отримання з рідкої фази в режимі зростання Странського-Крастанового епітаксійних структур з квантовими точками [И. Е. Марончук, А. И. Марончук, Т. Ф. Кулютина, М. В. Найденова, И. В. Чорный. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава// Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2005, № 12, с. 95-99] - прототип. Спосіб включає нагрів до температури T_1 монокристалічної підкладки і насичених розчинів заданого складу, приведення поверхні підкладки в контакт з розчином для вирощування квантових точок, а тильної поверхні підкладки - в контакт з тим, що має температуру T_p теплопоглиначем, який на поверхні підкладки створює імпульс охолодження $\Delta T_p = T_1 - T_p$, для формування масиву квантових точок на поверхні нанорозмірного «змочувального» шару, що утворюється, потім приведення ли-

цевої поверхні підкладки при температурі T_1 в контакт з розчином для вирощування спейсерних шарів, постійна ґрати матеріалу яких співпадає з постійною ґрат матеріалу підкладки, а тильної поверхні підкладки в контакт з теплопоглиначем, що має температуру T_p , який на лицевій поверхні підкладки створює імпульс охолодження для формування спейсерного шару, що покриває масив квантових точок, багаторазне повторення вирощування масивів квантових точок і що покривають їх спейсерних шарів, товщина яких забезпечує тунельний перехід носіїв заряду, приводить до створення багатшарових наногетероструктур з вертикально-зв'язаними квантовими точками. Проте спосіб, що описаний в прототипі, не дозволяє отримувати структури за квантовими точками без «змочувальних» шарів, а таким чином, не дозволяє отримувати наногетероструктури з масивами квантових точок для ефективних сонячних елементів та інших приборів з низьким рівнем рекомбінаційно-генераційних струмів.

У основу пропонованого винаходу поставлено завдання створення способу, який забезпечує можливість отримання багатшарових наногетероструктур з квантовими точками без «змочувальних» шарів, що призводить до ефективного перенесення носіїв заряду в проміжках між вертикально незв'язаними квантовими точками, а також дозволяє знижувати вартість багатшарових епітаксійних наногетероструктур, що виготовляються, з квантовими точками без погіршення їх характеристик.

Завдання досягається тим, що в способі вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок, після вирощування масиву квантових точок тильна поверхня підкладки приводиться в контакт з теплопоглиначем, температура якого T_p , котрий на лицевій поверхні підкладки здійснює імпульс тепла $\Delta T_n = T_n - T_1$ для розчинення частини δ_s вирощуваного «змочувального» шару між квантовими точками й областей з'єднання квантових точок в острівках, причому величина імпульсу тепла $|\Delta T_n| = (0,3 - 0,7) \Delta T_p$;

- багаторазне повторення вирощування масивів квантових точок з розчиною частиною «змочувального» шару між ними і що покривають їх спейсерних шарів, товщина яких не дозволяє здійснювати тунельний перехід носіїв заряду вертикально-зв'язаним квантовим точкам, що призводить до створення багатшарових наногетероструктур, перенесення носіїв заряду в яких здійснюється між квантовими точками по каналах, утворених з розчиною частини «змочувальних» шарів;

- послідовна зміна складу розчинів для вирощування спейсерних шарів приводить до формування квазіелектричного поля, що тягне, і ефективного перенесення носіїв заряду в проміжках між вертикально незв'язаними квантовими точками з області їх генерації до поверхонь наногетероструктури;

- послідовна зміна складу розчинів для вирощування квантових точок приводить до формування масивів квантових точок, розміри яких змінюються по товщині багатшарової наногетероструктури;

нюються по товщині багатшарової наногетероструктури;

- використання монокристалічної підкладки з матеріалу, постійна ґрати якого відрізняється від постійних ґрат матеріалу спейсерного шару менше 1 %, дозволяє знижувати вартість багатшарових епітаксійних наногетероструктур, що виготовляються, з квантовими точками без погіршення їх характеристик.

На відміну від прототипу, в заявленому способі окрім теплопоглинача використовується також теплонагрівач. Розміщення теплонагрівача на тильній стороні підкладки, після видалення теплопоглинача, розташування якого на тильній стороні підкладки привело до формування на її робочій поверхні нанорозмірного «змочувального» шару з масивом квантових точок, приводить до імпульсного нагріву (ΔT_n) підкладки та розчину раніше вирощеного нанорозмірного «змочувального» шару, що розташований поміж квантових точок, за умови, що $|\Delta T_n| = (0,3 - 0,7) \Delta T_p$, де імпульс тепла менш за аналогічних характеристик у імпульсу холоду (ΔT_p), який передував імпульсу тепла.

В «змочувальному» шарі величина частини δ_s залежить від величини механічної напруги, яка визначається властивостями матеріалів використовуваних для вирощування квантових точок (КТ) і спейсерних шарів, а саме: постійних ґрат цих матеріалів відповідно a_1 і a_2 , модулями їх зрушення G_1 і G_2 , числом атомів на одиниці поверхні Ns_1 і Ns_2 , питомим об'ємом кристалічної фази матеріалу квантової точки - Ω , характеристиками металу-розчинника: розчинністю в ньому матеріалів C_1 і C_2 , що кристалізуються, а також міжфазною поверхневою енергією на межі квантова точка - рідка фаза і головними радіусами кривизни поверхні розподілу фаз r_1, r_2 .

Відстань p між сусідніми квантовими точками залежить від постійних ґрат a_1 - матеріалу КТ і a_2 - матеріалу спейсерного шару і визначається за допомогою виразу

$$p = \frac{a_1 \cdot a_2}{a_1 - a_2}, \text{ діаметр } d \text{ основ КТ визначається}$$

$$\text{вираженням } d = 2 \sqrt{\frac{(\Delta\mu + \Delta\mu_T)(a_1 + a_2)a_1a_2Ns}{G(a_1 - a_2)^2}}, \text{ де}$$

$$\Delta\mu_T = \Omega\sigma(r_1^{-1} + r_2^{-1}) \Delta\mu = kT \ln\left(\frac{C}{C_0}\right).$$

Частина змочувального шару δ_s , що розчиняється, при використанні теплонагрівача, визначається виразом $\delta_s = p - d$.

Експеримент показує, що для видалення частини змочувального шару, що створює великі рекомбінаційно-генераційні струми, величина імпульсу тепла повинна складати (0,3-0,7) частини величини імпульсу холоду. Видалення частини змочувального шару дозволяє в наногетерострук-

турах із квантовими точками істотно понизити рекомбінаційно-генераційні струми і отримати масиви квантових точок з параметрами близькими до «ідеальних». Імпульс тепла $|\Delta T_n|$ не тільки дозволяє видаляти частину «змочувального» шару, але і ліквідує острівці із зрощених квантових точок, тобто розчиняє області з'єднання квантових точок в острівцях, де містяться дислокації невідповідності, відокремлюючи квантові точки один від одного.

Подальше зменшення рекомбінаційно-генераційних струмів в наногетероструктурах з квантовими точками здійснюється при розміщенні масиву квантових точок в областях наногетероструктури, що містять квазіелектричні поля. Використання нанорозмірних спейсерних шарів з напівпровідникового твердого розчину змінного складу, розташованих між шарами, таких, що містять масиви квантових точок вузькозонного матеріалу, відкривають можливості створення високоефективних сонячних елементів 3-го покоління, оскільки утворюються при використанні таких шарів квазіелектричні поля приводять до збільшення дифузійної довжини певного типу носіїв заряду і, тим самим, дозволяють здійснювати перенесення відповідних носіїв заряду з області їх генерації, тобто сприяють запобіганню рекомбінаційним струмам.

У сонячних елементах на основі наногетероструктур з квантовими крапками утилізація довговильового спектра сонячного випромінювання може здійснюватися як за рахунок надбар'єрного перенесення носіїв заряду і їх розділення на р-п переході, так і за рахунок тунельного механізму при підбар'єрному перенесенні по квантових точках.

Надбар'єрний перенесення носіїв заряду здійснюється шляхом двоступінчастого переходу електрона з валентної зони на проміжну зону, утворену збудженими поляганнями електрона в квантовій точці, а потім з проміжної зони в зону провідності матричного матеріалу, в якому електрон дифузійним перенесенням доставляється до р-п переходу. Наявність квазіелектричних полів в матричному матеріалі сприяє перенесенню електрона до р-п переходу.

Підбар'єрний механізм реалізується за наявності тунельно-прозорих спейсерних шарів між масивами вертикально-зв'язаних квантових точок. Тунельному механізму перенесення електронів по вертикально-зв'язаних квантових точках сприятимуть також квазіелектричні поля як в системі вертикально незв'язаних квантових точок.

Приклад 1.

Наногетероструктури з квантовими точками вирощувались на підкладці GaAs р-типу провідності з орієнтацією поверхні в площині $\{100\}$, на якій спочатку примусовим охолодженням розчину GaAs в розплаві Ga в інтервалі температури 500-450 °C вирощувався буферний шар GaAs п-типу провідності, а потім на його поверхні з розчину в розплаві In вирощувався шар квантових точок InAs в процесі імпульсного охолодження підкладки шляхом приведення її тильної сторони в контакт з теплопоглиначем, температура якого нижче тем-

ператури підкладки на 10 °C. Після того як теплопоглинач приймав свою первинну температуру підкладки, він замінювався на теплонагрівач, температура якого була на 6 °C вища за температуру підкладки. При цьому здійснювався розчин змочувального шару за рахунок імпульсного нагріву підкладки протягом часу, поки теплонагрівач не приймав первинну температуру підкладки. Далі розчин InAs в розплаві In був замінений на розчин GaAs в розплаві Ga, з якого здійснювалось нарощування нанорозмірного спейсерного шару GaAs шляхом імпульсного охолодження підкладки. В подальшому здійснювалось 12 аналогічних процесів, що містили:

- нарощування квантових точок InAs з розчину InAs в розплаві In;
- видалення «змочувального» шару шляхом поміщення на тильну поверхню теплонагрівача;
- зарощування квантових точок нанорозмірним спейсерним шаром.

Після завершення 12-го процесу методом імпульсного охолодження підкладки вирощувався шар GaAs п-типу провідності, товщиною 0,2-0,3 мкм, на поверхні якого нарощувався шар $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ р-типу провідності, товщиною 30 нм. На поверхні такої структури нарощувався підконтактний шар GaAs р-типу провідності товщиною 0,7-0,8 мкм. На основі отриманої гетероструктури з квантовими точками виготовлявся сонячний елемент шляхом нанесення суцільного контакту на тильній стороні структури та гребенчатого контакту на лицевій стороні структури. Параметри сонячного елемента вивчались після вскриття на лицевій поверхні вікон в підконтактному шарі. Зразки сонячних елементів отримані з цієї структури мали наступні параметри: $U_{xx} = 0,95\text{В}$, $I_{kz} = 19,5\text{ мА/см}^2$. Сонячні елементи з аналогічних структур, що були вирощені без використання теплонагрівача мали $I_{kz} = 18\text{ мА/см}^2$ при $U_{xx} = 0,82\text{В}$. Це свідчило про те, що використання теплонагрівача зменшує концентрацію рекомбінаційних центрів, що знижують ефективність перетворювачів сонячної енергії, що виготовлені на основі структур з квантовими точками.

Приклад 2.

Наногетероструктури з квантовими точками вирощувались на підкладці з GaAs р-типу провідності, на якій спочатку вирощувався буферний шар GaAs р-типу провідності, після чого вирощувався спейсерний шар $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ також р-типу провідності товщиною 6-7 нм, далі на цьому шарі нарощувався шар квантових точок з InAs, і за допомогою теплонагрівача видалявся змочувальний шар. На масиві квантових точок вирощувався спейсерний шар, але іншого складу $\text{Al}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{As}$. Далі вирощувався шар квантових точок з InAs, та після видалення змочувального шару теплонагрівачем на ньому вирощувався наступний спейсерний шар $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ тощо, поки на шар квантових точок InAs не був вирощений шар GaAs р-типу провідності. Цей останній шар GaAs р-типу вирощувався товщиною 0,2-0,3 мкм. Після цього на даному шарі вирощувався шар GaAs п-типу провідності, товщиною 0,2-0,3 мкм, на якому вирощувався масив квантових точок InAs, та за до-

помогою теплонагрівача видалявся змочуючий шар. Далі вирощувався спейсерний шар n-типу провідності $\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{As}$ товщиною 10 нм, далі на ньому вирощувався масив квантових точок InAs і після видалення змочувального шару теплонагрівачем вирощувався спейсерний шар n-типу провідності тощо, поки не був вирощений масив квантових точок InAs , на якому вирощували спейсерний шар n-типу провідності $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ товщиною 6-7 нм. На поверхні цього останнього шару $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ вирощується підконтактний шар GaAs n-типу провідності товщиною 0,4-0,6 мкм. На тильній поверхні виготовленої гетероструктури наносився суцільний омичний контакт. На лицевій поверхні виготовленої гетероструктури з використанням фотолітографії наносився гребінчатий омичний контакт, за допомогою травлення підконтактного шару GaAs . Між гребінками омичного контакту розкривались вікна в підконтактному шарі. Зразки сонячних елементів, отримані з цієї структури, мали спейсерні шари постійного складу $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$, мали менші струми $I_{k3} = 16 \text{ mA/cm}^2$, параметри: $U_{xx} = 1,5 \text{ В}$, $I_{k3} = 20 \text{ mA/cm}^2$. Сонячні елементи з аналогічних структур, але тих, що містять при $U_{xx} = 1,5 \text{ В}$. Це свідчило про те, що квазіелектричні поля нанорозмірних спейсерних шарів перемінного складу, що утворилися спейсерами перемінного складу знижують рекомбінаційні втрати генерованих носіїв заряду.

Приклад 3.

Підкладка GaP n-типу провідності з орієнтацією /100/, буферний шар GaP вирощувався товщиною 50-70 нм. На поверхні буферного шару вирощувався масив квантових точок з твердого розчину $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ перемінного складу, нарощуваних спейсерними шарами товщиною 4-5 нм, з твердого розчину $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ n-типу провідності. Після кожного вирощування масиву квантових точок здійснювалось видалення змочувального шару поміж квантовими точками шляхом використання теплонагрівача аналогічно прикладам 1 і 2, що дозволяло вирощувати квантові точки близько до ідеальних. Здійснювалось вирощування 6-ти масивів квантових точок, зарощених спейсерними шарами, вміст кремнію в кожному наступному шарі зменшувалось на 6 % та складало в останньому шарі 0 % кремнію на поверхні останнього спейсерного шару n-типу провідності вирощувався спейсерний шар p-типу провідності $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ товщиною 4-5 нм та масив квантових точок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ зі змістом кремнію 0 %. Потім здійснювалось вирощування 6-ти масивів квантових точок, зарощених спейсерними шарами зі змістом кремнію, що збільшувався в кожному наступному шарі на 6 %. Далі було здійснене вирощування 15 масивів квантових точок, що містили 40 % кремнію в твердому розчині

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. На останньому спейсерному шарі p-типу провідності нарощувався підконтактний шар GaP товщиною 100 нм.

Зразки сонячних елементів, отримані з цієї структури, що містять вертикально-пов'язані квантові точки мали наступні параметри: $U_{xx} = 2,1 \text{ В}$, $I_{k3} = 15 \text{ mA/cm}^2$.

Спектральна характеристика свідчила про те, що виготовлені сонячні елементи перетворювали короткохвильові випромінювання з довжиною хвилі до $\lambda = 250 \text{ нм}$.

Приклад 4.

Вирощування наногетероструктури здійснювалось на підкладці Si орієнтацією /100/, що містила p-n перехід. Р-область мала товщину 0,3 мкм, а n-область - 200 мкм. На поверхні p-області здійснювалось нарощування буферного шару кремнію товщиною 30 нм з розчину Si в розплаві Ga в процесі імпульсного охолодження підкладки. Потім на буферному шарі вирощували шар GaP товщиною 5 нм, на поверхні якого формувався масив квантових точок Ge . Після цього масив квантових точок зарощувався спейсерним шаром товщиною 4-5 нм, на якому знов вирощувався масив квантових точок. Після кожного вирощування масиву квантових точок здійснювалось видалення змочувального шару шляхом використання теплонагрівача, аналогічно попереднім прикладам 1, 2, 3, вирощувалось 12 шарів масивів квантових точок, зарощених спейсерними шарами GaP . На поверхні останнього спейсерного шару вирощувався підконтактний шар GaP товщиною 100 нм.

На поверхні n-області підкладки здійснювалось нарощування n-типу буферного шару кремнію товщиною 30 нм з розчину Si в розплаві Sn в процесі імпульсного охолодження підкладки. Потім на буферному шарі вирощували 12 шарів масивів квантових точок, що були зарощені спейсерними шарами GaP n-типу провідності. На поверхні останнього спейсерного шару вирощувався підконтактний шар GaP товщиною 200 нм. Зразки сонячних елементів, отриманих з цієї структури, мали параметри: $U_{xx} = 2 \text{ В}$, $I_{k3} = 18,5 \text{ mA/cm}^2$. Отримані результати свідчать про можливість отримання високоефективних сонячних елементів на основі кремнієвих пластин, при використанні наногетероепітаксійних шарів GaP з квантовими точками. Зразки сонячних елементів, отриманих з аналогічних структур, вирощених без квантових точок, мали параметри, які мало відрізнялись від вищезгаданих, тобто $U_{xx} = 1,9 \text{ В}$, $I_{k3} = 18 \text{ mA/cm}^2$. Можливо це пов'язано з тим, що в структурах з квантовими точками була недостатня кількість масивів квантових точок.