

4. Висновки

За результатами досліджень запропоновано використати в якості джерела поляризованого світла дисплейний екран персонального комп'ютера або смартфонів, планшетів. Це дало можливість наблизити контроль наявності механічних напружень у оптично прозорих матеріалах до умов виробництва. Також запропоновано і досліджено можливість покращення чутливості та точності контролю при використанні модуляційно-поляризаційного методу.

Література

1. Клюев, В. В. *Неразрушающий контроль* [Текст]: справочник / В. В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2004. – В 7 т., Т. 3. – 864 с.
2. ГОСТ Р 53696-2009. *Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения* [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
3. Ландсберг, Г. С. *Оптика* [Текст] / Г. С. Ландсберг. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
4. Застосування плоского або телевізійного екрана в стані включення в електричну мережу живлення персонального комп'ютера або телевізора як джерела інфрачервоного випромінювання [Текст]: патент України на корисну модель № 78910 від 10.04.2013 / Венгер Є. Ф., Маслов В. П., Качур Н. В., Лабузов О. Є., Афонін А. В., Кушовий С. М. – 2013. – Бюл. № 7.
5. Сардега, Б. К. *Модуляційна поляриметрия* [Текст] / Б. К. Сардега. – К.: Наукова книга, 2011. – 260 с.
6. Пристрій для контролю якості оптичних матеріалів [Текст]: патент України на корисну модель № 39789 від 10.03.2009 / Венгер Є. Ф., Сардега Б. К., Маслов В. П., Качур Н. В. – 2009. – Бюл. № 5.
7. Сардега, Б. К. *Комплексні дослідження якості сапфірових вікон сучасними неруйнівними методами* [Текст]/

Б. К. Сардега, І. Є. Матяш, П. М. Литвин, В. П. Маслов, С. М. Кушовий // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – №43. – С. 54-60.

8. Кардона, М. *Модуляционная спектроскопия* [Текст] / М. Кардона. – М: Мир, 1972. – 416 с.
9. Спосіб контролю матеріалів, прозорих в оптичному діапазоні випромінювання [Текст]: патент України на корисну модель № 49479 від 26.04.2010 / Венгер Є. Ф., Качур Н. В., Кіндрась О. П., Локшин М. М., Ляпіна А. Б., Марічева І. Л., Маслов В. П., Родічев Ю. М. – 2010. – Бюл. № 8.
10. Спосіб лазерного контролю якості кристалічних матеріалів, прозорих в оптичному діапазоні випромінювання [Текст]: патент України на корисну модель № 57495 від 25.02.2011 / Венгер Є. Ф., Качур Н. В., Маслов В. П. – 2011. – Бюл. № 4

РАЗВИТИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПОСОБОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены методы оптического неразрушающего контроля. Исследована возможность использования оптического поляризационного способа контроля для выявления механических напряжений в стекле. Исследованы возможности повышения точности оптического контроля. Результаты исследования могут быть применены в оптическом производстве для контроля качества материалов и готовых оптических деталей

Ключевые слова: техническая диагностика, оптический метод контроля, поляризация.

Качур Наталия Владимировна, молодой научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарьова НАН Украины, Украина, e-mail: natalykachur@gmail.com

Качур Наталия Владимировна, младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарьова НАН Украины, Украина, e-mail: natalykachur@gmail.com

Kachur Nataliya, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Ukraine, e-mail: natalykachur@gmail.com

УДК 537.5

Новосядлий С. П.,
Кіндрат Т. П.

ВАРІЗОННІ НАПІВПРОВІДНИКИ ТА ЇХНЄ ЗАСТОСУВАННЯ

Представлено аналіз варізонних напівпровідників, які використовуються для створення сонячних елементів. Встановлено можливості підвищення їхнього ККД. Варізонні напівпровідники - це кристали, в яких енергетичні параметри зонної структури - ширина забороненої зони, спин-орбітальне розчинення в v -зоні, а також ефективні маси носіїв заряду і діелектрична проникливість, плавно змінюються вздовж одного або декількох напрямів.

Ключові слова: варізонний, напівпровідник, кристал, сонячний елемент.

1. Вступ. Зонна діаграма кристалу

Інтерес до варізонних напівпровідників викликано особливостями, проявлених в них багатьох фізичних явищ, а також виникненням нових ефектів, не властивих напівпровідникам з однорідною зонною структурою, які назвемо гомозонними. Просторова залежність ширини забороненої зони приводить до появи вмонтованих квазіелектричних шарів, різних за величиною для дірок і електронів, що відповідно змінюють їх рухливість. Це зумовлює дифузійно-дрейфовий механізм переносу нерівноважних носіїв заряду, зміну координатного розподілу їх концентрацій, зміну умов

поверхневої рекомбінації в порівнянні з гомозонними напівпровідниками. А це відкриває нові можливості для формування нових видів напівпровідникових приладів для структур ВІС. Всі ці особливості приводять до суттєвих відмінностей в інжекційних, фотоелектричних і люмінісцентних явищах [1]. Вигляд зонної структури варізонного напівпровідника визначається просторовим розподілом вмонтованого мікросталу, а також наявністю внутрішніх та зовнішніх мікрополів: поля магнітних напружень, електричного, температурного. Неоднорідність таких полів в просторі приводить до відповідної неоднорідності зонної структури, що є наслідком дії двох механізмів. За одним із них зовнішні

мікрополя спотворюють мікропотенціали в кожній електричній коміці, відповідно змінюють обумовлену цим мікропотенціалом зонну структуру, за другим механізмом потенціальна енергія електронів в монокристалі додається до енергії електронів в дозволений зоні $\epsilon(\vec{R}, \vec{r})$, де \vec{r} - радіус вектор, \vec{R} - хвильовий вектор для даного стану в зоні. В результаті цього повна енергія електронів в зоні визначається виразом:

$$E = \epsilon(\vec{R}, \vec{r}) - q\phi(\vec{r}), \tag{1}$$

де $\phi(\vec{r})$ - потенціал електростатичного мікрополя.

Розглянемо більш детально зв'язок між енергією зони провідності E_c і ϕ для кристалу змінного складу, враховуючи градієнт електричної спорідненості. Позначимо через E_0 енергію електрона в стані спокою у вакуумі при відсутності зовнішнього макрополя (рис. 1). Координатна залежність макрополя описується рівністю

$$E^*(z) - E_0 = -q\phi(z). \tag{2}$$

Електронна спорідненість визначається як $\Theta = E^* - E_c$. При $E^* = E_0$ і величина електронної спорідненості на межі кристалу з вакуумом рівна Θ_0 , тоді

$$\begin{aligned} E_c(z) &= E_0 - \Theta(z) - q\phi(z) = \epsilon_c(z) - q\phi(z), \\ E_v(z) &= E_0 - \Theta(z) - E_0(z) = \epsilon_v(z) - q\phi(z). \end{aligned} \tag{3}$$

Таким чином, повна потенціальна енергія електрона в с-зоні складається із зонної енергії, що визначається мікрополем кристалу та електростатичної потенціальної енергії $q\phi(z)$, що визначається вже макрополем. Ці дві величини є координатно залежними [2].

Отже прийнятий для гомозонних напівпровідників прийом опису потенціалу макрополя ϕ за допомогою енергетичного рівня, що проходить через середину забороненої зони є вже неможливим для варізонного напівпровідника. Це пов'язано із тим, що $\nabla\phi$ згідно (3) і рис. 1 є не пропорційний ∇E_c та ∇E_v .

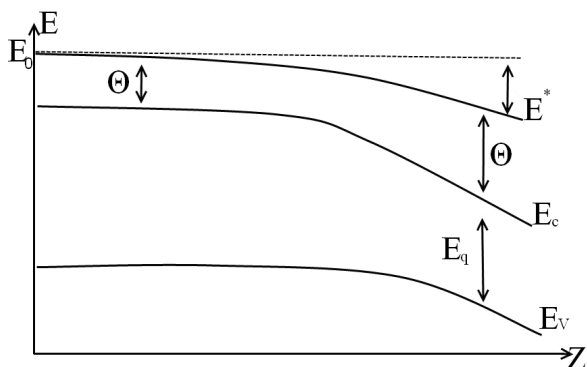


Рис. 1. Одномірна модель варізонного напівпровідника

2. Високоєфективні сонячні елементи на варізонних структурах

Варізонним напівпровідникам властиві принципові особливості в спектральних залежностях і величинах власної фотопровідності в порівнянні з гомозонними матеріалами, що освітлені з широкозонної сторони обумовлено наступним:

1. Випромінювання поглинається в діапазоні $\Delta E_q = E_q^{max} - E_q^{min}$, а це досить сильно розширює область спектральної чутливості.
 2. Фотони з енергією $h\nu$ локально поглинаються в об'ємі в точці Z_0 де $E_q(Z_0) = h\nu$, тобто може підвищуватись фоточутливість за рахунок зниження рекомбінаційних втрат на освітленій поверхні, до якої ННЗ рахуються в гальмівному полі [3].
 3. При швидкості дрейфу ННЗ, спів розмірною із швидкістю рекомбінації I_0 , вплив поверхневої рекомбінації значно послаблюється і в області $h\nu > E_q^{max}$. Це відповідно підвищує фоточутливість і в короткохвильовій частині спектру, причому при достатньо великих ∇E_q короткохвильовий край може бути зміщений в область енергії фотонів, які суттєво підвищують E_q^{max} .
 4. Носії створені фотонами з енергією $h\nu \approx E_q^{min}$, причеплюються вмонтованими полями до вузькозонної поверхні. При високих значеннях поверхневої рекомбінації I_d фоточутливість в довгохвильовій області спектру може і понижуватись [4].
- Однією із перспективних застосувань приладів із фотовольтаїчними ефектами на основі варізонних напівпровідників є сонячна енергетика. Типова структура і спрощена еквівалентна схема варізонного сонячного ФЕП з р-п-переходом приведена на рис. 2.

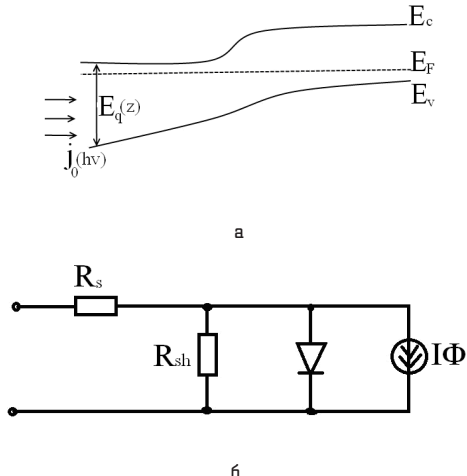


Рис. 2. Зонна діаграма варізонного ФЕП (а) та еквівалентна схема (б)

Основною величиною, що пред'являється до СЕ – це висока ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, що характеризується ККД $\eta = P/P_0 = N/P_0$, де I, V - вихідний струм і напруга СЕ, а P_0 - потужність падаючого випромінювання [5]. Для забезпечення максимального ККД необхідно забезпечити максимальну вихідну потужність $P_m = I_m \cdot V_m$, що визначається матеріалом, конструкцією приладу і відповідними вибором робочої точки на ВАХ. В даному режимі фактор заповнення $FF = \frac{V_m \cdot I_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$, де I_{sc}, V_{oc} - струм короткого замикання та напруга холостого ходу ФЕП [6].

Величина R_x слабо впливає на вихідну потужність і нею можна в повній мірі знехтувати. В той час ще опір R_s величиною в декілька Ом приводить до зниження вихідної потужності на десятки процентів.

Для отримання максимальної вихідної потужності потрібно задовільнити ряд протирічних величин, які

необхідно пред'явити до матеріалу і конструкції ФЕП. Тут також необхідно забезпечити оптимальне узгодження його спектральної характеристики із спектром випромінювання сонця. Вузькозонні напівпровідники поглинають значну долю сонячних фотонів і, як наслідок, дають великі значення фотоструму. Про те при цьому генерується низька фото е.р.с [7]. Крім цього, вся надлишкова на E_q енергія фотонів губиться на розігрів ґратки. При величинах E_q досягаються високі значення е.р.с і малі значення струму насичення I_0 , але більша частина фотонів з $h\nu < E_q$ взагалі не поглинаються. Розрахунки показують, що для ідеальних гомозонних ФЕП в земних умовах оптимальне значення $E_q = 1,35\text{eV}$, що забезпечує К.К.Д $\eta = 31\%$. В космічному просторі максимальною ефективністю повинні мати СЕ з $E_q \geq 1,6\text{eV}$ [8].

Причинами втрат генерованих світлом носіїв заряду, які обмежують ККД є поверхнева і об'ємна рекомбінація. Для зниження об'ємних втрат необхідно розміщувати р-п-перехід ближче до поверхні. Проте при цьому зменшується вклад фото е.р.с довгохвильових фотонів і збільшується послідовний опір R_s , що є небажаним. Відповідно для зменшення R_s необхідно підвищувати провідність поверхневого шару, але при високих концентраціях легуючої домішки зменшується дифузійна довжина і скорочується область збирання фото носіїв [9].

На гомозонних ФЕП із GaAs з р-п-переходом при оптимальній конструкції з просвітлюючим покриттям досягнутий ККД 19,3 % в умовах освітлення AM1.

Значний крок вперед в покращенні параметрів СЕ зв'язаний із застосуванням гетеропереходів. Наявність широкозонних вікон дозволила значно розширити спектральні характеристики СЕ у високоенергетичну область, збільшити товщину фронтального шару і таким чином понизити R_s , враховуючи параметри контактної гребінки. В результаті в гетероепітаксійній системі р-Al_xGa_{1-x}As-n-GaAs досягнута ефективність $\geq 25\%$ при AM1 [10].

3. Висновки

1. У варизонних напівпровідниках просторова залежність ширини забороненої зони зумовлює дифузійно-дрейфовий механізм переносу нерівноважних носіїв заряду, зміну координатного розподілу їх концентрацій, зміну умов поверхневої рекомбінації в порівнянні з гомозонними напівпровідниками.
2. Наявність широкозонних вікон дозволила значно розширити спектральні характеристики СЕ у високоенергетичну область, збільшити товщину фронтального шару і таким чином понизити R_s , враховуючи параметри контактної гребінки. В результаті в гетероепітаксійній системі р-Al_xGa_{1-x}As-n-GaAs досягнута ефективність $\geq 25\%$ при AM1.

Література

1. Новосядлий, С. П. Технологія САПР на основі тестових структур [Текст] / С. П. Новосядлий // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т3, №3. – С. 179-189.
2. Новосядлий, С. П. Моделювання субмікронної та нанотехнологій на основі ТС [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук, С. М. Вергешний // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 1/7 (37). – С. 26-38.
3. Шур, М. Современные приборы на арсениде галлия [Текст]/

4. М. Шур. – М.: Мир, 1991. – 628 с.
4. Афанасьев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки ПД нейтронная техника. Сер 1 [Текст] / В. А. Афанасьев, М. П. Духновский, Т. А. Крысов // Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 12. – С. 24-29.
5. Новосядлий, С. П. Технологічні особливості, формування шаруватих наноструктур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – № 44. – С. 32-38.
6. Ди Лоренцо, Д. В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления БИС [Текст]: пособ.; пер. с англ. / под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. – М: Радио и связь, 1988. – 49 с.
7. Новосядлий, С. П. Багатошарова радикальна імплантація при формуванні SOI- структур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т. 9, № 3. – С. 659-667.
8. Новосядлий, С. П. Багатошарова іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишень і металізації субмікронних структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський // Металофізика і новітні технології. – 2007. – Т. 29, №7. – С. 857-866.
9. Аваз, Н. А. Основы микроэлектроники [Текст]: учеб. / Н. А. Аваз, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – М: Радио и связь, 1999. – С. 64-67.
10. Новосядлий, С. П. Джерела іонів для формування шаруватих структур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський // Прикарпатський вісник НТШ. – 2008. – № 1. – С. 151-158.

ВАРИЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Представлен анализ варизонных полупроводников, которые используются для создания солнечных элементов. Установлено возможности повышения их КПД. Варизонных полупроводники - это кристаллы, в которых энергетические параметры зонной структуры - ширина запрещенной зоны, спин-орбитальное растворение в ν -зоне, а также эффективные массы носителей заряда и диэлектрическая проницаемость, плавно меняются вдоль одного или нескольких направлений.

Ключевые слова: варизонный, полупроводник, кристалл, солнечный элемент.

Новосядлий Степан Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка, Україна, e-mail: nsp@pu.if.ua

Кіндрат Тарас Петрович, аспірант, кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка, Україна, e-mail: kindrat@i.ua

Новосядлий Степан Петрович, доктор технических наук, профессор, кафедра компьютерной инженерии и электроники, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаніка, Украина, e-mail: nsp@pu.if.ua

Киндрат Тарас Петрович, аспирант, кафедра компьютерной инженерии и электроники, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаніка, Украина, e-mail: kindrat@i.ua

Novosyadlyy Stepan, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine, e-mail: nsp@pu.if.ua

Kindrat Taras, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine, e-mail: kindrat@i.ua