

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Показано, що через використання сапфірової підложки зі сформованими на ній елементами дифракційної оптики можливе підвищення світлового виходу світлодіодних гетероструктур до 75%. Пропонується розширити спектр випромінювання гетероструктур до білого за рахунок використання при їх формуванні низькоенергетичних іонів індію.

© І.О. Яворський, В.Г. Вербицький, В.І. Осінський, 2003

УДК 621.382

І.О. ЯВОРСЬКИЙ, В.Г. ВЕРБИЦЬКИЙ,
В.І. ОСІНСЬКИЙ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОДІОДНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЯ

В світлодіоді при майже 100% перетворенні електричної енергії в світлове випромінювання назовні виводиться близько 30-40% світлового потоку, а решта затримується за рахунок повного внутрішнього відбиття та оптичного поглинання в елементах конструкції [1]. Тому проблема виводу випромінювання і підвищення світлової ефективності є однією з основних при розробці світлових діодів.

Вирішення зазначеної проблеми можливе за рахунок формування світловипромінюючих напівпровідникових гетероструктур на підложках з високим оптичним відбиттям [2], або високою прозорістю і низьким показником заломлення, використання для виводу випромінювання шарів фотонних кристалів, створених із багатокомпонентних твердих розчинів змінного складу [3], а також формування елементів дифракційної оптики та оптимізації конструкції світлодіодів.

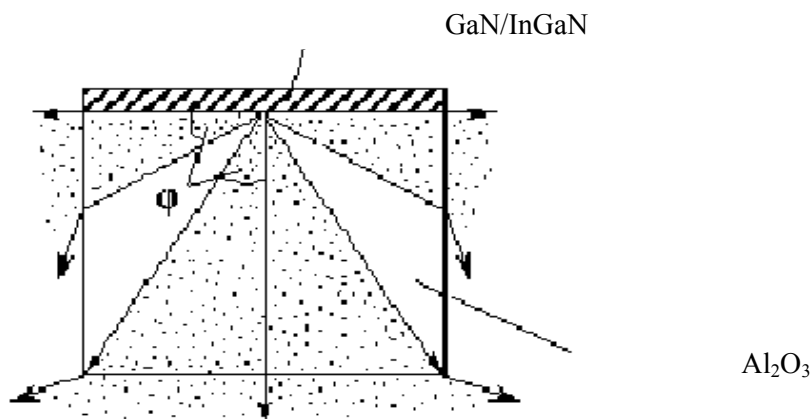
Як приклад розглянемо гетероструктуру на основі нітриду галія [4], важливою особливістю якої є можливість створення на її основі світлодіодів з білим спектром випромінювання (рис. 1). Тут активний випромінюючий прошарок площею $500 \times 500 \text{ мкм}^2$ розміщений на прозорій для білого спектра сапфіровій (Al_2O_3) підложці з показником заломлення $n_0=1,78$. Товщина підложки 400 мкм. Хід променів у такій конструкції розраховується на основі відомих закономірностей проходження світла через границю двох середовищ. Так званий "конус виходу" випромінювання [1], що характеризує світ-

лову ефективність, при низьких показниках заломлення більш коректно визначається кутом Брюстера

$$\varphi = \arctg \frac{1}{n_0}, \quad (1)$$

і становить близько 30° .

Необхідно врахувати, що в зазначеній конструкції більша частина випромінювання буде виходити через бокові грані. Це справедливо для будь-якої точки випромінюючої поверхні.



РІС. 1. Розповсюдження світла в мікрочіпах світлодіодів GaN/InGaN на сапфірових підложках; $\varphi = 30^\circ$; ← траєкторії випромінювання для центральної випромінюючої точки

Світлова ефективність конструкції з урахуванням ізотропності випромінювання і відсутності його поглинання визначається виразом

$$\eta = 1 - 1,415 \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right), \quad (2)$$

що для $\varphi = 30^\circ$ дає значення $\eta = 0,6$. З поправкою на коефіцієнт пропускання $T = 4n_0(1 + n_0)^{-2}$ [1], що становить 0,92, маємо величину $\eta = 0,6 \cdot 0,92 = 0,55$. Таким чином, світлова ефективність у даному випадку не перевищує 55%.

З метою збільшення світлового виходу пропонується вдосконалити вищенаведену конструкцію шляхом нанесення на бокові та нижню сторони сапфірової підложки полімерного прошарку ($n_1 = 1,5$) зі сформованими на ньому дифракційними оптичними елементами (рис. 2). При цьому кут Брюстера на границі

сапфір-полімер складає $40,1^\circ \left(\arctg \frac{n_1}{n_0} = 40,1^\circ \right)$, а кут повного внутрішнього відбиття – $57,4^\circ \left(\arcsin \frac{n_1}{n_0} = 57,4^\circ \right)$. Так як відсутній різкий перехід від проходження до відбиття світла (різниця в кутах складає $17,3^\circ$), то конус виходу випромінювання в даному випадку доцільно визначати кутом $\varphi = 45^\circ$. Оскільки при цьому коефіцієнт пропускання $T = 0,99$, то це означає, що в полімер переходить майже все випромінювання, що інжектується гетероструктурою в сапфірову підложку.

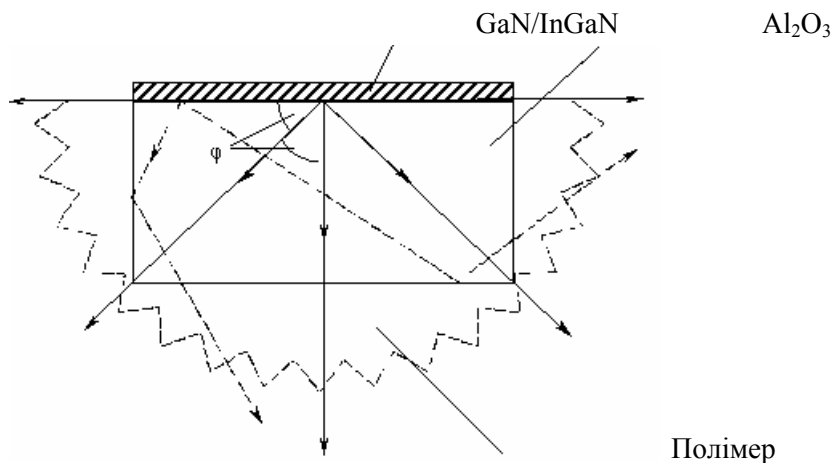


РИС. 2. Геометрія мікрочіпа світлодіода з полімерною мікролінзою з ґратчастою структурою поверхні; $\varphi = 45^\circ$; \leftarrow траєкторії випромінювання для центральної випромінюючої точки; \leftarrow траєкторії випромінювання для довільної периферійної випромінюючої точки

У наведеній конструкції товщина сапфірової підложки залишається сталою (400 мкм), а розміри випромінюючої гетероструктури дещо збільшуються (800×800 мкм²). Полімерну оболонку доцільно формувати у вигляді напівсфери, в яку вмонтовано світлодіодну структуру. Це дасть змогу використати технологію лиття або штамповки при виготовленні оболонки і розміщених у ній елементів дифракційної оптики.

Дифракційні елементи формуються в полімері у вигляді ґратчастої структури з синусоїдальним або трикутним рел'єфом [5]. Маючи дифракційну ефективність $\sim 75\%$, вони дозволяють виводити назовні випромінювання при ковзаючо-

му (до 80°) його падінні. Оскільки розсіяне у полімерну оболонку випромінювання складає майже 100%, то це означає, що вихід світла, або ефективність світлодіода, загалом може зрости до 75%, що є на рівні сучасних світових досягнень.

Підвищити ефективність і функціональні можливості світлодіодів на основі нітриду галію можливо також шляхом вдосконалення технології отримання гетероструктур. Відомо, що такі світлодіоди випромінюють блакитне або зелене світло залежно від концентрації індію в твердому розчині InGaN. Просування в жовту та червону частини спектра для одержання всієї гами кольорів стри-мується поганою розчинністю InN у GaN для концентрації індію більше 12% при температурах до 1000°C . Підвищення температури формування гетерошарів з великою концентрацією індію вимагає ускладнення технологічного устаткування, призводить до забруднення структур неконтрольованими домішками та великим механічним напругам при охолодженні структур до кімнатних температур.

Більш технологічним є локальне введення іонів індію у кристалічну ґратку нітриду галію. При енергіях іонів ~ 100 еВ локальна температура досягає $80 \cdot 10^3^{\circ}\text{C}$ [6]. У цьому випадку інтегральна температура росту гетероструктури може знизитись до $200 - 300^{\circ}\text{C}$, а розчинність буде повною зі створенням стабільних або метастабільних фаз у мікро- та нанообластях. При інжекції в дані області електронів і дірок можливо одержати білий спектр випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 450 нм до 750 нм.

Берг А., Дин П. Светодиоды. – М.: Мир, 1979. – С. 550 – 563.

Schnitzer I., Yablonovitch E., Caneau C., Gmitter T.J. Ultrahigh spontaneous emission quantum efficiency, 99,7% internally and 72% externally, from AlGaAs/GaAs/AlGaAs double heterostructures // Applied Physic Letters. – 1993. – 62, №2. – P. 131 – 133.

Осинский В.И., Привалов В.И., Тихоненко О.Я. Оптоэлектронные структуры на многокомпонентных полупроводниках. – Минск: Наука и техника, 1981. – С. 208.

Shuji Nacamura et al. Candela-Class high brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue light emitting diodes // Applied Physic Letters. – 1994. – 64, №13. – P. 1687 – 1689.

Савицкий Г.И., Герке Р.Р. Спектральные характеристики голограммных дифракционных решеток в режиме скользящего падения. – В кн.: Голографические оптические элементы и системы. – Санкт-Петербург: Наука, 1994. – С. 76 – 81.

Verbitsky. Ion technologies in micro- and optoelectronics // Proceedings of SPIE “Optoelectronic Information Technologies”. – N-Y.: – 2001. – Vol. 4425. – P. 384 – 390.

Одержано 01. 07. 2002