

УДК 621.382

МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРЕГРІВУ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ СВІТЛОДІОДІВ

Гаврилюк Ю.М., к.т.н., професор

Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського

39614, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20

E-mail: nich@polytech.poltava.ua

Сукач Г.О., д.ф.-м.н., професор, Бушма О.В., к.т.н., с.н.с.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

03110 м. Київ, вул. Солом'янська, 7

E-mail: sukach@duikt.edu.ua

Богословська А.В., к.ф.-м.н.,

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова

03028 м. Київ, проспект Науки, 45

E-mail: bogoslov@isp.Kiev.ua

Представлены методы и устройства для определения температуры перегрева активной области светодиодов DT_{AO} в процессе их эксплуатации. Рассмотрены контактные и бесконтактные методы определения DT_{AO} : проанализированы их преимущества и недостатки. Значительное внимание уделено электролюминесцентным методам контроля DT_{AO} приборов оптоэлектроники с р-п-переходами. Освещены преимущества этих методов в сравнении с известными в литературе.

Ключевые слова: светодиоды, температура перегрева, оптоэлектронные приборы.

The methods and devices for determination of overheating temperature of active region in the light-emitting diodes (LEDs) and lasers DT_{AO} are considered during their operation. The contact and indirect methods of DT_{AO} definition are considered: their advantages and drawbacks are analyzed. The significant attention is given to electroluminescent methods of the DT_{AO} control of optoelectronic devices with potential barriers. The advantages of these methods are considered in comparison with known.

Key words: light-emitting diodes, overheating temperature, optoelectronic devices.

Вступ. Температура перегріву будь-якого приладу електронної техніки визначає надійність, довговічність і працездатність як самого приладу, так і всієї системи, в якій використовується цей прилад. Відомо, що генерація теплоти в напівпровідниковому приладі відбувається впродовж усього часу, коли до нього прикладена зовнішня напруга. Це призводить до зниження коефіцієнта корисної дії, а для випромінювачів світла - до довгохвильового зсуву довжини хвилі в максимумі смуги випромінювання. Перегрів тієї області приладу, в якій локалізована прикладена до нього напруга (активна область приладу найбільш уразливе по тепловідводу місце), до максимально припустимої температури, за якої прилад ще здатний виконувати свої функції у стаціонарних, імпульсних і перехідних режимах експлуатації, призводить до різкого зниження надійності радіоелектронної апаратури в цілому і до її катастрофічних відмов. Численні програми випробувань показали, що зростання DT_{AO} , наприклад, напівпровідникового випромінювача на 80°C призводить до дворазового зменшення квантового виходу випро-

мінювання, а підвищення її на кожні 10°C – приблизно до дворазового скорочення терміну служби [1]. Тому розробка методів і пристроїв для точного й ефективного контролю не тільки абсолютної величини температури р-п-переходу, але й її зміни в процесі експлуатації актуальна як у науковому, так і в прикладному аспектах, зокрема, з метою оптимізації конструкторсько-технологічних режимів виготовлення напівпровідникових приладів за тепловими параметрами.

У літературі нагромадився досить великий експериментально-методичний матеріал із проблем визначення DT_{AO} діодів, транзисторів, тиристорів, різного типу світлодіодів (СВД) і лазерів із потенціальними бар'єрами, інтегральних схем [2-5]. Знання теплових параметрів, забезпечення ефективного відводу тепла від р-п-переходу важливо для розробників напівпровідникових приладів і пристроїв.

Мета роботи. Огляд методів вимірювання і аналіз роботи пристроїв для визначення DT_{AO} СВД і напівпровідникових лазерів у процесі експлуатації при живленні імпульсним струмом. В таких прила-

дах коливання температури призводить до періодичних змін не тільки інтенсивності випромінювання Φ , але й довжини хвилі в максимумі смуги випромінювання λ_{\max} , що обумовлює виникнення істотних похибок у роботі радіоелектронної апаратури. Причому, на зміну температури, а також величин Φ та λ_{\max} , істотно впливає не тільки коливання амплітуди збуджуючого імпульсного струму I , але й зміна скважності Q , тривалості t_i імпульсів, теплових постійних часу τ , нагрівання-охолодження СВД i , що особливо важливо, співвідношення між внутрішніми фізичними параметрами (τ_i) і зовнішніми параметрами живлення (t_i і Q) приладу [6].

Матеріал і результати досліджень. Існуючі на даний час методи виміру DT_{AO} приладів поділяються на прямі (контактні) і непрямі (безконтактні) [2]. Контактні методи вимагають монтажу мікротермопари (чи іншого мініатюрного датчика температури) безпосередньо на поверхні структури, що досліджується. Вони мають порівняно високу точність вимірювання та теоретично високу просторову роздільну здатність, але остання важко реалізується через труднощі монтажу термопари безпосередньо поблизу активної області. Однак необхідність відкритого доступу до активної області структури, що є практично нездоланною перешкодою для готових до експлуатації приладів, а також вплив самої термопари на температуру джерела тепла роблять цей метод малоперспективним при вимірюванні температури в області максимального перегріву.

Непрямі методи, основними з яких є оптичний, хімічний, електрофізичний і люмінесцентний, знайшли застосування для вимірювання теплових параметрів напівпровідникових бар'єрних структур. Аналіз переваг і недоліків методів проведений у роботі [1].

Оптичний метод забезпечує загальну картину розподілу температури по поверхні відкритої напівпровідникової структури, вказує особливо гарячі ділянки при скануванні поверхні в інфрачервоному мікроскопі та має роздільну здатність 0,5 – 1 мкм. Цей метод найбільш корисний при тепловому розрахунку потужних напівпровідникових приладів як засіб, що дозволяє запобігти утворенню доменів із підвищеною температурою в активній області напівпровідникової структури. Однак для одержання точних і достовірних результатів необхідно ретельне настроювання системи та тривалий аналіз отриманих даних.

Хімічний метод є відносно дешевим та базується на нанесенні на поверхню напівпровідникової структури тонкого шару, який відображає температуру речовини (наприклад, рідкого кристалу). Цей метод не знайшов поширення через низькі роздільну здатність і точність та значну тривалість і складність підготовки процесу вимірювання.

Загальний недолік цих двох методів – необхідність мати відкритий доступ до активної області приладів.

Найпоширенішим для масового контролю теплових параметрів є електрофізичний метод, суть якого полягає у використанні функціональних чи кореляційних зв'язків між температурою приладу і попередньо прокаліброваним термочутливим параметром (пряма чи зворотна напруга, прямий чи зворотний струм, бар'єрна сміність, статичний чи диференціальний опір p-n-переходу) [2]. Цей метод, незважаючи на широке застосування, має декілька недоліків.

1. Як правило, у таких пристроях має місце нелінійна та недостатньо різка залежність між температурою і вимірюваним електрофізичним параметром у широких межах робочих температур, а також нелінійна залежність контрольованого параметра від величини струму, що призводить до необхідності знімати градувальні криві при східчастій зміні температур і струмів.

2. Порівняно низька роздільна здатність і точність вимірювання, а також висока вартість контрольно-вимірювальної апаратури.

3. Вплив температури навколишнього середовища на результати вимірювань.

4. Похибка вимірювань, пов'язана з нагрівом приладу вимірювальним струмом.

Суттєвим недоліком усіх електрофізичних методів є необхідність комутації режимів роботи приладу з нагрівального на вимірювальний, а також неможливість вимірювання температури безпосередньо під час проходження струму чи хоча б одразу після його закінчення. Це обумовлює основну частку похибки вимірювання температури, особливо в нестаціонарних (імпульсних) режимах.

Відзначимо, що мінімальна відносна похибка у визначенні DT_{AO} для всіх трьох розглянутих вище методів не може бути нижчою ніж 30-40% [2].

Для визначення DT_{AO} прямозонних напівпровідникових світловипромінюючих структур при $T > 300\text{K}$ найбільш часто застосовується метод, у якому як термочутливий параметр зручно використовувати енергію кванта в максимумі смуги випромінювання $h\nu_{\max}$, що прямо пов'язана з шириною забороненої зони напівпровідника

$$E_g(T) = E_g(0) - aT^2(T + q)^{-1}, \quad (1)$$

де $E_g(0)$ - ширина забороненої зони при $T = 0\text{K}$; a - температурний коефіцієнт E_g , q - дебаївська температура.

При цьому аналіз результатів роботи [7] показав, що нелінійність $E_g(T)$ вносить адитивний внесок практично в усі термочутливі параметри. Зокрема, при використанні в якості термочутливого параметру V_{p-n} нелінійність, яка обумовлена залежністю $E_g(T)$, складає менше половини сумарної нелінійності. Така ситуація дозволяє спростити процес лінеаризації (чи істотно зменшити похибку за його відсутності), якщо як термочутливий фактор обраний параметр, пов'язаний з E_g .

Використання факту функціональної залежності $h\nu_{\max}(T)$ дозволило запропонувати електролюмінесцентний метод виміру DT_{AO} [7-9]. У цьому методі при заданій амплітуді імпульсного струму I з фіксованими t_i і Q вимірюють $h\nu_{\max}$ і шляхом порівняння її з градувальною кривою визначають температуру активної області СВД [8]. Однак при зміні кожного з параметрів імпульсного струму (I , t_i і Q) необхідно робити повторні вимірювання $h\nu_{\max}$, що істотно позначається на точності контролю DT_{AO} . Крім того, в такому способі визначення DT_{AO} залишаються недоліки, пов'язані зі складністю, тривалістю та громіздкістю градування та вимірювання. Особливо важливим контроль DT_{AO} стає при експлуатації СВД з епоксидним компаундом, температура розм'якшення якого складає близько 110°C і підвищення якої неприпустиме через виникаючі при цьому незворотні зміни в приладі [10].

Нижче описані розроблені нами високоточні методи вимірювання температури перегріву активної області СВД при імпульсних збудженнях.

Уже відзначалося, що існуючі методики вимірювання DT_{AO} в імпульсних режимах малозастосовні через її складну залежність не тільки від I , але й від t_i і Q . З метою спрощення способу вимірювання температури випромінюючих р-п-переходів при фіксованих t_i і Q був реалізований спосіб, в основу якого покладено експериментально встановлений факт лінійної залежності $h\nu_{\max}$ СВД від амплітуди струму, що протікає при фіксованих параметрах t_i і Q [8]. При цьому зміна температури навколишнього середовища T_{nc} призводить до паралельного зсуву залежностей $h\nu_{\max}(I)$, а варіація параметрів t_i і Q змінює кут нахилу цих кривих.

Така ситуація свідчить про те, що при варіації хоча б одного з параметрів пари t_i і Q нагрівання активної області СВД різко змінюється, і температура при цьому не може бути визначена, що раніше не враховувалося [2, 6].

Таким чином, якщо при фіксованій парі t_i і Q виміряти два значення енергії квантів $h\nu_3$ і $h\nu_4$ у максимумі спектра випромінювання, що відповідають двом фіксованим значенням амплітуди імпульсного струму I_1 і I_2 при заданій температурі T_{nc} , то надалі для будь-якого робочого значення імпульсного струму I можна визначити температуру р-п-переходу за формулою:

$$T_{AO} = \left(\frac{h\nu_1 - h\nu_2}{T_1 - T_2} \right)^{-1} \left(\frac{h\nu_3 - h\nu_4}{I_1 - I_2} \right) I + T_{nc} \quad (2)$$

Перший співмножник у виразі (2) відповідає градувальному режиму вимірювання. Тут $h\nu_1$ і $h\nu_2$ - енергії квантів у максимумі смуги випромінювання, які виміряні при температурі навколишнього середовища T_1 і T_2 та негріючих струмах ($I \rightarrow 0$). Цей співмножник характеризує температурний коефіцієнт ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу. Таке градування для заданої напів-

провідникової сполуки здійснюється тільки один раз, у той час як для інших t_i і Q необхідно знову визначати $h\nu_3$ і $h\nu_4$.

Пристрій для реалізації цього методу складається з послідовно з'єднаних генератора каліброваних імпульсів СВД, що досліджується, оптичної системи, яка формує промені, монохроматора, фотоприймача та системи обробки й індикації інформації. Відносна похибка визначення DT_{AO} не перевищує 5-10%, що для теплових вимірів є дуже високим показником.

На виході вимірювального пристрою формується сигнал, який характеризує температуру активної області СВД та відповідає заданим параметрам I та T_{nc} з урахуванням коливань температури та складу матеріалу.

Недоліком цього пристрою є те, що при визначенні температури не враховується залежність температурного коефіцієнту α від складу багатокомпонентного матеріалу. Це призводить до того, що знижується точність виміру T_{AO} , при цьому необхідно підбирати еталонний прилад із точно відомими характеристиками і калібрувати вимірювальну систему.

Для усунення впливу залежності температурного коефіцієнта ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу від відсоткового співвідношення компонентів цього матеріалу застосовано спеціальний пристрій [9]. Пристрій дозволяє визначити температуру перегріву активної області T_{AO} з урахуванням впливу коливань температури навколишнього середовища та впливу змін концентрації одного з компонентів твердого розчину світлови-промінюючої структури на результати вимірів.

Для ілюстрації зміни температурного коефіцієнта ширини забороненої зони α у трикомпонентному твердому розчині $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ зі зміною сполуки x розглянемо дані, що представлені на рис. 1. Зміна α зі зміною x здійснює внесок у сигнал, що вимірюється. Причому, якщо в процесі вимірювання доводиться визначати температуру активної області напівпровідникових приладів із різних партій, то похибка виміру температури може досягати $\sim 10^\circ\text{C}$. Цей сигнал обумовлює також похибку вимірювання T_{AO} . Застосований пристрій [11] дозволяє підвищити точність вимірювання T_{AO} за рахунок урахування та наступного виключення сигналу похибки, що пов'язана зі зміною співвідношення компонент напівпровідникової сполуки.

Зміна величини x призводить до зміни величини α . Величина α визначається наступним виразом:

$$a = a_{em} + \Delta a_{кор} \quad (3)$$

На виході вимірювального пристрою в цілому формується сигнал, який характеризує температуру активної області випромінювача, а також відповідає заданим параметрам імпульсного струму ($T = const$, $Q = const$) і поточним значенням струму I та температури навколишнього середовища T_{nc} приладу з урахуванням її коливань без впливу змін величини x . У

цілому це забезпечує підвищення точності вимірювання температури та спрощення цього процесу.

Уведення додаткових блоків корекції дозволяє усунути похибку вимірювання T_{AO} (або підвищити точність вимірів), пов'язану зі зміною сполуки

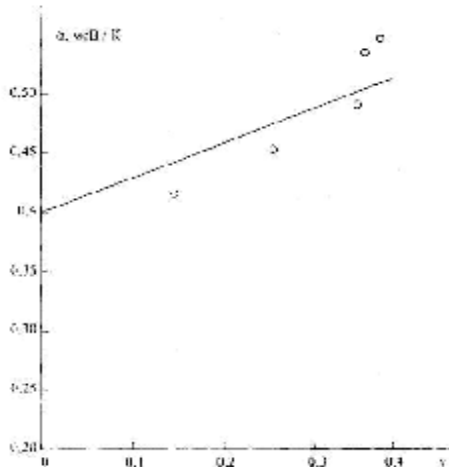


Рисунок 1 – Залежність температурного коефіцієнта α зміни E_g $Ga_{1-x}Al_xAs$ при $T = 300$ К від складу x

де a_{em} - температурний коефіцієнт ширини забороненої зони еталонного приладу; $\Delta a_{кор}$ - відхилення величини a від установленого значення a_{em} , за якого проводилося калібрування вимірювального пристрою.

твердого розчину світловипромінюючої структури, що важливо при розробці нових конструкцій приладів, які працюють при підвищених струмах.

Техніка реалізації підвищення точності пристроїв зі структурною надлишковістю інформації, яка формується в додатковому каналі, достатньо розроблена в теоретичному і практичному аспектах шляхом установлення функціонального зв'язку між фізичною величиною і відповідною приладовою величиною [12]. Однак необхідно підкреслити, що проблема контролю теплових параметрів СВД при імпульсних збудженнях важлива і дотепер цілком не вирішена.

Висновки. Аналіз сучасного стану вимірювання ΔT_{AO} приладів із потенціальними бар'єрами дає змогу оцінити вірогідність застосування різних методів для контролю температури перегріву активної області тих чи інших напівпровідникових приладів. Відзначимо порівняно низьку точність (не нижче 40%) відомих методів (оптичного, хімічного і електрофізичного) визначення ΔT_{AO} . Показана перспективність електролюмінесцентних методів контролю ΔT_{AO} СВД, особливо для випадків збудження імпульсним струмом. Це, по-перше, створює можливість визначення ΔT_{AO} у процесі експлуатації, чого ін-

шими методами досягти неможливо, і, по-друге, реалізує порівняно високу ($\leq 15\%$) точність вимірювань. Варто звернути увагу на те, що порівняння результатів, отриманих різними методами, вимагає великої обережності і огляду на необхідність системного аналізу та врахування виникаючих похибок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зигель Б. Измерение теплового сопротивления – ключ к обеспечению нормального охлаждения полупроводниковых компонентов // *Электроника*, 1978. № 51(14). – С. 43-51.
2. Рабинерсон А.А., Ашкинази Г.А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1976. – 295 с.
3. Мгебрян Р.Г., Нейгауз Л.М., Носов Ю.Р. Анализ тепловых характеристик диодного оптрона в стационарном режиме // *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*, 1976. № 8. – С. 70-77.
4. W.B. Joyce, R.W. Dixon/ Thermal Resistance of Heterostructure Lasers / *J. Appl. Phys.*, 46(6). 1975. - p. 855-862.
5. Абдуллаев О.Р., Абрамов В.С., Гаршинин Л.В. Тепловые свойства излучающих диодов с локализацией области излучения // *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*, 1986. № 4(183). – С. 74-80.
6. Сукач Г.А., Олексенко П.Ф., Бушма А.В., Горонескуль В.Ю. Изменение характеристик излучения светодиодов при вариации внутренних факторов и параметров импульсного возбуждения. *Измерительная техника*. 1999. № 12. – С. 37-38.
7. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. –М.: Радио и связь, 1986. – С. 216.
8. А.с. 1389454 СССР, МКИ G01R 31/26. Способ определения температуры излучающих p-n-переходов // С.В.Свечников, В.П. Сушков, Г.А. Сукач и др., 1987.
9. Патент 36152 Україна МПК G01R 31/26. Пристрій для визначення температури активної області світловипромінюючих приладів // Г.О. Сукач, П.Ф. Олексенко, С.М. Білоусов, 2001.
10. Применение оптоэлектронных приборов // С. Гейг, Д.Эванс, М. Ходапп, Х. Соренсен. –М.: Радио и связь, 1981 – С. 344.
11. Воробкало Ф.В., Глинчук К.Д., Прохорович А.В. Температурная зависимость ширины прямой запрещенной зоны твердых растворов $Ga_{1-x}Al_xAs$ // *ФТП*. 1975. № 9(5), – С. 998-1001.
12. Г.И. Разоренов. Выбор масштабов при моделировании. –М.: Радио и связь, 1973 – С. 285.

Стаття надійшла 11.02. 2007
Рекомендована до друку д.т.н., проф.
Саленко О.Ф.