

ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

УДК 621.383:621.381.2

PACS: 85.60.JB

МЕХАНІЗМИ ВІДМОВИ ТА ДЕГРАДАЦІЯ ПОТУЖНИХ СВІТЛОДІОДІВ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЮ

В. П. Велешук¹, О. І. Власенко¹, О. В. Ляшенко², М. П. Киселюк¹

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
03028, м. Київ, Проспект Науки, 41

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка
03680, м. Київ, Проспект Академіка Глушкова, 4
E-mail: vvvit@ukr.net

МЕХАНІЗМИ ВІДМОВИ ТА ДЕГРАДАЦІЯ ПОТУЖНИХ СВІТЛОДІОДІВ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЮ

В. П. Велешук, О. І. Власенко, О. В. Ляшенко, М. П. Киселюк

Анотація. В роботі встановлені причини та механізми виходу з ладу потужних світлодіодів на основі GaN в момент вмикання (при подачі напруги включення) за рахунок плавлення тонкого струмопідвідного контакту на основі золота. Виявлено швидку деградацію потужних світлодіодів при підвищених постійних прямих струмах.

Ключові слова: потужний світлодіод, GaN, вихід з ладу

MECHANISMS OF FAULTS AND DEGRADATION OF HIGH POWER LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON THE GALLIUM NITRIDE

V. P. Veleschuk, O. I. Vlasenko, O. V. Lyashenko, M. P. Kisselyuk

Abstract. In paper reveals reasons and mechanisms of fault of high power light-emitting diodes based on the GaN in the moment of switching (at the work voltage switch) due to melting of thin whisker contact based on the gold. Found out rapid degradation of high power light-emitting diodes at increasable constant direct currents.

Keywords: high power light-emitting diode, GaN, fault

МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗА И ДЕГРАДАЦИЯ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

В. П. Велешук, А. И. Власенко, О. В. Ляшенко, М. П. Киселюк

Аннотация. В работе установленные причины и механизмы выхода из строя мощных светодиодов на основе GaN в момент включения (при подаче напряжения включения) за счет плавления тонкого токоподводящего контакта на основе золота. Выявлена быстрая деградация мощных светодиодов при повышенных постоянных прямых токах.

Ключевые слова: мощный светодиод, GaN, отказ

Вступ

На даний час яскраві потужні світлодіоди (СД) синього та білого кольору випромінювання на основі InGaN/GaN гетероструктур починають інтенсивно застосовуватись в інформаційних системах для створення СД-панелей з мікропроцесорним керуванням, підсвітки рідкокристалічних панелей та, навіть, загального освітлення. При цьому у порівнянні із індикаторними СД потужні СД з площею структури 1 мм² мають більш високу схильність до виходу з ладу, незважаючи на використання захисних зворотних діодів та драйверів [1]. Це зумовлене тим, що потужні InGaN/GaN СД мають меншу за індикаторні СД напругу зворотного пробую та, відповідно, дуже чутливі до зворотного пробую [1,2], оскільки відомо, що GaN є слабким п'єзоелектриком і у деформованому стані (а для СД в робочому стані термомеханічні напруги можуть сягати 10⁷–10⁹ Па [3]) здатен акумулювати значний заряд [1]. Одночасно потужні СД мають більшу площу і відповідно більш неоднорідний розподіл внутрішніх механічних напруг (ВМН), дислокацій, легуючих домішок та компонент індію чи алюмінію в шарах InGaN та AlGaIn. Відповідно при проходженні значних струмів (350 мА) гостро постає проблема термомеханічних напруг та концентрування струму по локальним низькоомним областям та поблизу контакту, де локальна густина струму може в десятки разів перевищувати усереднене значення [4]. При цьому структури потужних СД не можна обробляти та експлуатувати при температурі $T > 85$ С.

Тому метою роботи було дослідження причин та механізмів відмови потужних світлодіодів на основі GaN.

Експеримент та обговорення

1. ВАХ потужних InGaN/GaN світлодіодів при підвищених струмах

Досліджувались потужні світлодіоди виробників Osram, Seoul Semiconductors, Pro Light та Fogyard. ВАХ всіх досліджуваних потужних СД були практично схожими та дещо відрізнялись напругою включення. Типова ВАХ, а також температура їх зовнішнього контакту (аноду, катоду) наведено на рис.1.

Виявлено, що ВАХ потужних світлодіодів синього кольору випромінювання мають ді-

лянку D незворотного спаду струму (рис.1 криві 1, 2), що відповідає незворотному зростанню диференціального опору з часом. Таким чином нахил ВАХ до (крива 1) та після (крива 2) деградації при проходженні постійного прямого струму певної критичної величини (більше номінальної) відрізняється.

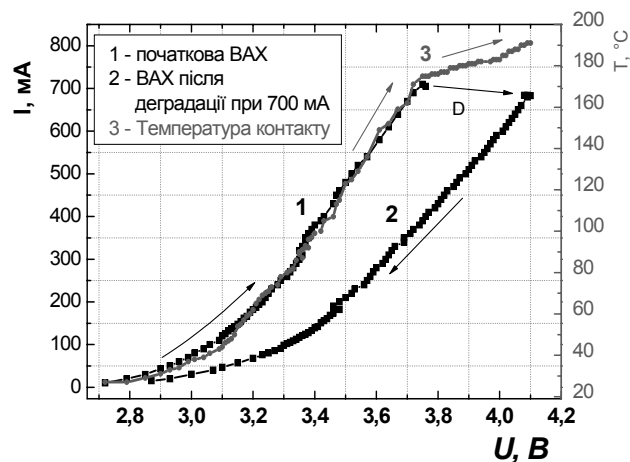


Рис. 1. ВАХ потужного світлодіоду синього кольору випромінювання

Раніше у [3] нами було встановлено (для індикаторних світлодіодів), що ділянка D відповідає появі інтенсивної акустичної емісії, яка є відображенням активних нерівноважних процесів та дефектоутворення. Відповідно, можна припустити, що і для потужних СД подібні зміни ВАХ відбуваються за рахунок дефектоутворення; вірогідно як при релаксації неоднорідних термомеханічних напруг в об'ємі структури та в приконтактних областях, так і за рахунок дефектоутворення в контактах.

При зростанні струму до докритичних значень разом із ним синхронно в часі монотонно зростає температура T (рис. 1. крива 3), а залежності T(U) та I(U) при певному масштабі побудови схожі одна з одною, тобто корелюють, а це, очевидно, пов'язано із загальними механізмами змін T(U) та I(U).

В то же час при досягненні критичних значень I та U відбувається швидко (десятьки секунд — хвилини) незначне зменшення I та суттєве збільшення U (ділянка D на рис.1), одночасно температура продовжує зростати при цьому незворотному переході від однієї ВАХ (крива 1 на рис.1) до іншої (крива 2 на рис.1) за рахунок зростання диференційного опору гетероструктури та зростання джоулевого тепла, що виділяється.

Відмітимо, що при зниженні температури СД за рахунок додаткового тепловідводу від СД величина критичних значень струму для початку ділянки D суттєво зростає. Наприклад, при використанні мідного або алюмінієвого тепловідводу діаметром 4 см та висотою 4 см зовнішня температура світлодіоду була 30...35 °С протягом 30...40 хвилин при 500 мА (а не 140 °С при відсутності тепловідводу), а ВАХ не деградувала, що вказує на достатньо ефективний тепловідвід. Відповідно інтенсивність електролюмінесценції зростає, хоча, звичайно, ККД світлодіоду дещо знизився, оскільки при підвищенні струму інтенсивність тепловиділення в активній області зростає.

Відмітимо, що для деяких екземплярів потужних СД білого випромінювання виявлено, що вони не виходять з ладу та не деградують протягом 4–5 год при достатньо суттєвому перевищенні типових параметрів, а саме при $I = 700$ мА та $T = 120$ °С.

Таким чином, зміна ВАХ разом з одночасним зникненням кореляції залежностей $T(U)$ та $I(U)$ свідчить про початок деградаційних процесів за рахунок дефектоутворення та може бути в ряді випадків використано в системах контролю в режимі реального часу.

2. Причини та механізми виходу з ладу потужних InGaN/GaN світлодіодів

В ході досліджень виявилось, що потужні світлодіоди у порівнянні з індикаторними мають велику схильність до виходу з ладу саме в момент подачі напруги. При цьому основним механізмом відмови було плавлення (руйнування) струмопідвідного контакту на основі золота діаметром 15–30 мкм або приблизно посередині провідника (рис. 2 а, б), або в області омічного контакту до гетероструктури (рис. 2 в).

При цьому, оскільки після плавлення контактів в більшості випадків сама структура лишалася працездатною (рис. 2 г), було проведено аналіз причин та механізмів виходу з ладу потужних СД. При цьому, безумовно, актуальним є усунення самих причин їх виходу з ладу.

Струмопідвід на рис. 2 г здійснювався за допомогою тонких ($d \approx 40$ мкм) провідників з опором 0,7 Ом, довжиною 3 см. (відмічено стрілкою на рис. 2 г). Інтенсивність свічення більшості структур була практично незмінною у порівнянні з початковою (до «виходу з ладу») і при номінальному струмі подальша деграда-

ція та руйнування таких структур, а також надмірний нагрів вище 80 °С не відбувались.

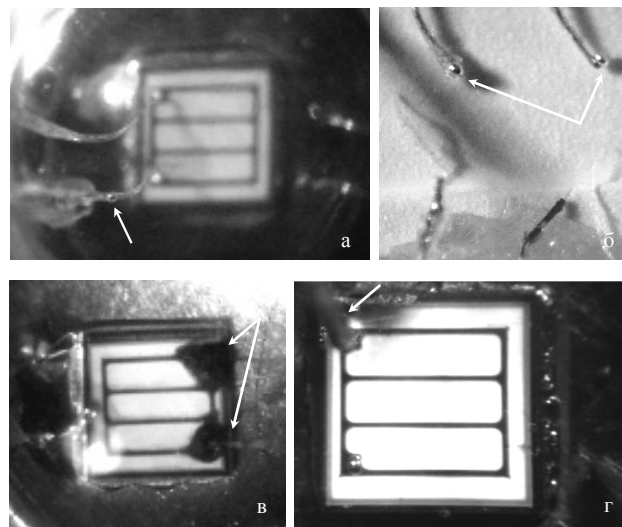


Рис. 2. Фото потужних СД після виходу з ладу. а, б — плавлення посередині провідника, в — плавлення в місці кріплення до гетероструктури, г — функціонуюча структура після руйнування тонкого контакту посередині. СД Pro Light (PG1N-1LBT)

У більшості випадків руйнування самого струмопідвідного контакту на основі золота, структура лишалася практично неушкодженою та придатною до експлуатації після приєднання нових контактів, а при руйнуванні контакту в області контакту (рис. 2 в) в структурі інтенсивність ЕЛ була дуже слабкою та неоднорідною або ж відсутня. При цьому зростав струм витоку.

Очевидно, плавлення контакту відбувається в місцях локального тепловиділення, де температура сягає максимального значення, при цьому тепловідвод є недостатнім, оскільки швидкість локального зростання температури є вищою, ніж швидкість її усередненого зниження за рахунок відведення тепла в об'єм структури та/чи в металеві зовнішні контакти. Омічний контакт (Me/GaN) є областю, де відбувається інтенсивне виділення тепла (I^2R) за рахунок контактного опору, незважаючи на те, що GaN має високий коефіцієнт тепло- та температуро- провідності — 1,3 Вт/см·°С та 0,43 см²/с, відповідно, [5]. Відомо, що опір омічного контакту в структурах на основі GaN становить 10^{-5} – 10^{-7} Ом·см² [6].

Проаналізуємо типові причини та механізми виходу з ладу світлодіодів для виявлення причини відмови та механізму у нашому випадку.

Розрізняють деградацію активної області структури світлодіоду, напівпровідникової

структури, деградацію електродів світлодіоду, областей омичних контактів, деградацію захисного компаунду (герметика, полімера) світлодіоду за рахунок термічного впливу, пропускання струму, електричного перевантаження, електростатичного розряду, що може призвести до виходу з ладу [7]. Зокрема, відомі такі види відмов як падіння зовнішнього квантового виходу (принято до рівня 50 %), механізм — погіршення коефіцієнту інжекції, падіння внутрішнього квантового виходу за рахунок зростання концентрації дефектів, що є центрами безвипромінювальної рекомбінації, утворення та рух дислокацій, зокрема в р-n- переході [7]. Є також вид відмови за рахунок зростання контактного опору за рахунок корозії контакту та дефектоутворення в місці контакту [7].

При цьому відомо, що однією з причин виходу з ладу потужних СД на основі нітриду галію є електростатичні розряди, оскільки GaN є широкозонним напівпровідником і відповідно має значний опір, при цьому зворотні розрядні струми набагато небезпечніші за прямі струми [1, 2]. Для усунення даної проблеми використовують схеми захисту від електростатичних розрядів на основі кремнієвих діодів чи стабілітронів, що вмонтовані у світлодіоди [1]. Проте у

використовуваних нами потужних світлодіодах даний захист при різкому вмиканні не завжди спрацьовував, тому можна припустити, що механізм відмови може мати іншу природу.

Контакт на основі золота може руйнуватись також за рахунок значної різниці між коефіцієнтами термічного розширення металу та герметика (наповнювача), що оточує структуру, проте використання гелеподібного силіконового герметика в потужних СД виключає даний механізм руйнування контакту, а в деяких світлодіодах між структурою та захисною лінзою герметик був відсутній (є пустота).

На рис.3 наведено сигнал напруги 2,4 В при включенні потужного СД та його спектральний склад. Сигнал реєструвався в режимі напруги осцилографом Tektronix TDS-1012. Видно, що спостерігаються осциляції за рахунок перехідних процесів, при цьому в спектрі присутні високочастотні (ВЧ) складові струму до 2 ГГц.

Відповідно в момент включення/виключення СД в його контактах присутній скін-ефект, за рахунок чого струм починає витіснятись до поверхні провідника, протікати не через весь його переріз, а, відповідно, загальний опір провідника зростає, що призводить до значного тепловиділення. При цьому присутній значний

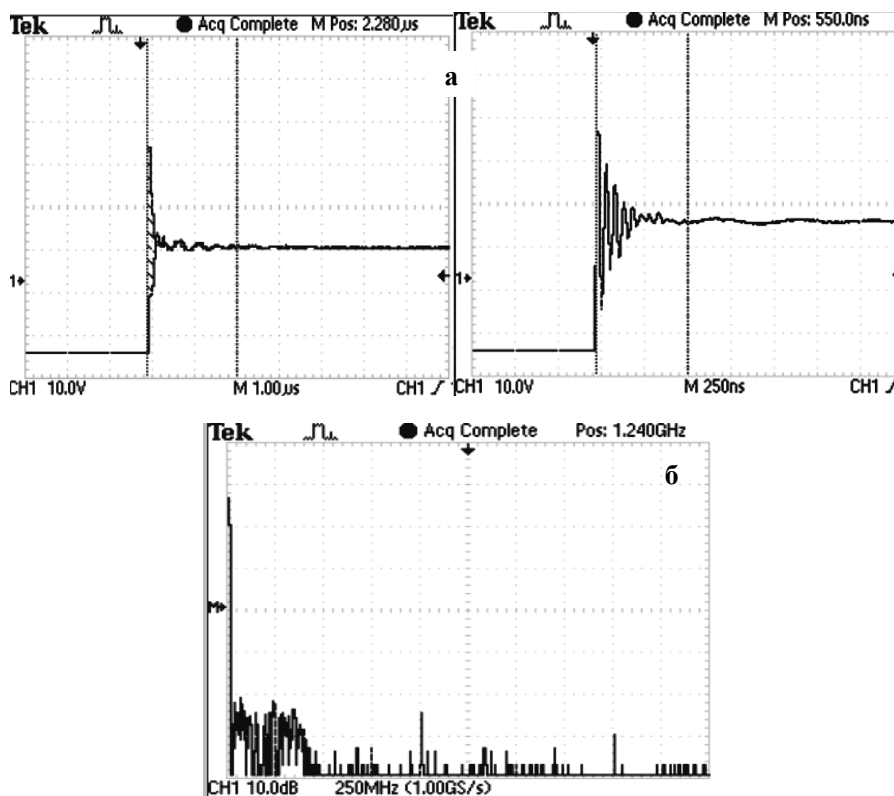


Рис. 3. Сигнал при подачі на потужний світлодіод постійної напруги 2,4 В (а) та його спектральний склад (б)

викид напруги і відповідно струму. В цілому це призводить до локальних перегрівів контактів та контактної області. Відмітимо, що оскільки електричний опір (p-n- переходу, контакту, металу) та тепловий опір залежить від температури, при вмиканні за рахунок зміни цих опорів також можливі зміни (осциляції) струму.

Відомо, що температура плавлення золота — $1063,4^\circ\text{C}$, а омичного контакту на основі сплаву золота з вмістом Ni, Ag, Ti, Pt, Al в декілька процентів $T_{\text{пл}} \approx 700\dots 900^\circ\text{C}$ [6]. В нашому випадку (рис.2) зафіксований факт плавлення контакту при включенні, в той же час при пропусканні високих густин постійного прямого струму плавлення контакту не відбувалося навіть при струмах до 1500 мА. Відмітимо, що при таких струмах відбувалось інколи плавлення Pb-Sn припою на зовнішніх контактах СД, температура плавлення якого $230\text{--}260^\circ\text{C}$.

Причини та фактори, які можуть впливати на руйнування (плавлення) струмопідвідних контактів на основі золота в потужних СД на основі GaN :

- омичний нагрів, пропорційний I^2R , як самого провідника, так і області контакту;
- явище скін — ефекту;
- перехідні процеси в загальному LCR — контурі схеми включення світлодіоду, тремтіння контакту у вмикачі при вмиканні, екстра-струми.

Світлодіод можна представити еквівалентною електричною схемою з послідовно з'єднаних індуктивностей, обумовлених струмопідвідними контактами, опору та контуру, що складається з дифузійних ємності і опору p-n- переходу, зокрема як у [8]. Відповідно перехідний процес у світлодіодах може розглядатися аналогічно перехідному процесу в еквівалентному лінійному LCR — ланцюзі.

Під час перехідного процесу незмінними залишаються лише струм в індуктивності і напруга в ємності, напруга і струми в інших елементах схеми змінюються стрибкоподібно, до того ж електричний та тепловий опори контакту та структури залежать від температури. Тому при включенні струм при наростанні перевищує номінальний і відбувається імпульсний локальний нагрів та перегрів.

Відмітимо, що стрибок струму у вигляді дельта-функції є також типовою причиною перегорання спіралей розжарення в лампах та плавкого провідника в запобіжниках при

включенні, оскільки опір холодної спіралі (металевого провідника) приблизно в декілька раз менший, ніж розігрітої. В принципі, для усунення вищеописаних проблем на сьогодні розроблені і використовуються драйвери для світлодіодів, які стабілізують струм, але вони зазвичай розраховані на певну напругу та мають доволі високу вартість.

Оцінимо глибину скін-шару тонкого круглого провідника з золота, яка визначається зменшенням напруженості електричного поля в e раз, при цьому глибина скін-шару за [9]

$$\delta \approx c \sqrt{2 \frac{\epsilon_0}{\omega \mu_m}} \rho, \quad (1).$$

де $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — абсолютна діелектрична проникливість вакууму, ρ — питомий опір, c — швидкість світла, μ_m — відносна магнітна проникливість (близька до одиниці для пара- та діаманетиків — золота, міді, срібла і т. д.), $\omega = 2\pi f$ — кругова частота. Для золота $\rho = 2,25 \cdot 10^{-2}$ Ом·м [9].

На рис.4 наведена розрахована за (1) залежність глибини скін- шару від частоти поля f до 2 ГГц для провідника із золота. З рис.4 видно, що для частот вищих за 100 МГц відбувається витіснення поля і відповідно протікаючого струму на поверхню, зокрема для частот 0,8 - 2 ГГц глибина скін-шару $\delta \sim 2$ мкм. Відповідно ефективний переріз провідника, через який протікає струм з високочастотними компонентами, зменшується, його опір зростає та зростає кількість виділеного тепла і температура локальної області.

Оцінимо температуру області контакту в моделі імпульсних електричних перенавантажень дискретних напівпровідникових приладів (діодів та транзисторів), коли існує пласке, діюче короткочасно, джерело тепла потужністю P в напрямку нормалі до p-n- переходу, при якому виникають імпульсні електричні перенавантаження. Температура імпульсного нагріву задається виразом з [10]

$$T = \frac{P}{S} \sqrt{\frac{\tau}{\pi K_t \rho C_p}} + T_{\text{кім}}, \quad (2)$$

де в нашому випадку $S = 7 \cdot 10^{-10}$ м² — площа переходу в місці контакту до напівпровідника (GaN), тобто площа виділення тепла; K_t — коефіцієнт теплопровідності GaN, $\rho = 6150$ кг/м³ — густина, $C_p = 490$ Дж/кг·°C — теплоємність

[5], P — миттєва потужність, що поглинається, яка за [10]

$$P = I(t)^2 R + U_3 \cdot I(t), \quad (3)$$

де R є сумою опору квазінейтральної області $R_{\text{кв}}$ (що примикає до контакту) та опору провідника $R_{\text{пров}}$; $I(t)$ — імпульс струму; U_3 — напруга на збідненій області, і при прямому зміщенні з [10] $I(t)R_{\text{кв}} \gg U_3$. Відмітимо, що опір $R_{\text{пров}}$ є змінним за рахунок скін-ефекту. У нашому випадку (рис.3 а) оберемо $I(t)$ у вигляді $I(t) = I_0 \exp(-t/\tau)$, τ — тривалість імпульсного перевантаження (~300 нс, згідно рис.3 а). Залежність (2) справедлива для часів електричного перевантаження $10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$ с.

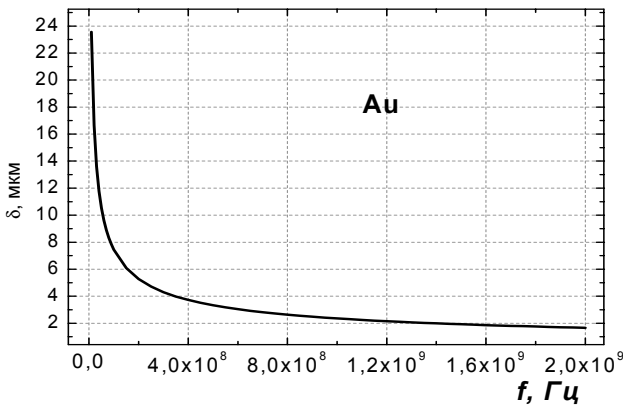


Рис. 4. Залежність глибини скін- шару δ від частоти електромагнітного поля f .

На рис.5 наведено розраховану залежність температури в області контакту від опору R для трьох значень струму I_0 . Видно, що розрахована температура, що досягається внаслідок тепловиділення може перевищувати температуру плавлення контакту.

При проходженні струму (інжекції через p-n- перехід) в структурі присутня латеральна компонента струму — вздовж поверхні, а також розтікання струму по верхньому контакту, однак руйнування завжди відбувається в місці припою контакту на основі золота.

Таким чином, руйнування контакту в нашому випадку в момент подачі постійного прямого струму відбувається через плавлення за рахунок одночасної сукупної дії кількох чинників (механізмів) в області максимального опору, де відбувається імпульсне виділення температури, якщо має місце скін-ефект.

Відмітимо, що наші результати узгоджуються з висновками роботи [11], де встановлено, що в потужних світлодіодах Cree (з одним

контактом) при живленні імпульсним прямим струмом відмова виявляється або за рахунок перегорання золотого дроту, або за рахунок деградації кристалла. Однак авторами [11] можливим механізмом руйнування для світлодіодів Cree названа ударна іонізація, хоча і відмічається залежність амплітуди струму руйнування металевого контакту від швидкості наростання струму під час перехідного процесу внаслідок скін-ефекту.

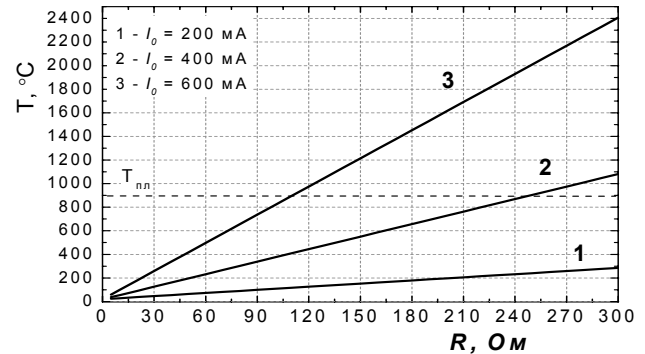


Рис. 5. Залежність температури області контакту від його опору для пікових значень струму I_0 .

Можна зауважити, що запобігання впливу скін-ефекту можливе при зміні геометрії струмопідвідних контактів до гетероструктури, наприклад — на смужки металу з тонкої фольги. Це знизить вплив зміни опору при виникненні скін-ефекту за рахунок стабілізації ефективної площі перерізу S_e при протіканні імпульсного струму (наприклад для частот, менших за 2 ГГц $S_e \approx \text{const}$ при $h \approx 2$ мкм) та, одночасно, збільшить ефективний тепловідвід за рахунок збільшення ефективної поверхні струмопідвідних контактів.

Висновки

В потужних світлодіодах на основі нітриду галію при подачі напруги вмикання виявлено механізм їх руйнування за рахунок імпульсного розігріву при наростанні та осциляціях струму у перехідних процесах та за рахунок скін-ефекту, що призводить до плавлення тонкого струмопідвідного провідника посередині його або в області його контакту до гетероструктури, при цьому сама гетероструктура в деяких випадках залишається неушкодженою.

Встановлено, що ділянка незворотного спаду струму на вольт-амперних характеристиках потужних InGaN/GaN світлодіодів відповідає

моменту незворотної зміни нахилу ВАХ, свідчить про початок деградаційних процесів за рахунок дефектоутворення та супроводжується синхронним монотонним зростанням температури, що може бути використано для неруйнівного контролю та діагностики.

Робота виконана при фінансовій підтримці Державної цільової науково-технічної програми «Розробка і впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних пристроїв на їх основі». Тема № 34/4.2.3/17, держ. реєстр № 0109U004882.

Список літератури

1. Шуберт Ф. Е., Светодиоды. пер. с англ. А. Э. Юновича. — М.: Физматлит, 2008. — 496 с.
2. Wen T. C., Chang S. J., Lee C. T., Lai W. C., Sheu J. K., Nitride-based LEDs with modulation-doped AlGa_N-Ga_N superlattice structures // IEEE Trans. Electron. Dev. — 2004. — Vol.51. — P. 1743.
3. Велешук В. П., Власенко О. І., Ляшенко О. В., Мягченко Ю. О., Байдуллаєва А., Чуприна Р. Г., Кравцов М. В., Будов О. Д., Акустична емісія при релаксації локальних термомеханічних напруг в процесі деградації світловипромінюючих гетероструктур на основі InGa_N та GaAsP // Український фізичний журнал. — 2008. — Т.53, № 3. — С. 240 -246.
4. Bulashevich K. A., Evstratov I. Yu., Mymrin V. F. and Karpov S. Yu., Current spreading and thermal effects in blue LED dice // Phys. Stat. Solidi (c). — 2007. — Vol.4, No 1. — P. 45–48.
5. Параметры полупроводниковых соединений и гетероструктур на их основе. — Электронна адреса: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/>.
6. Шеремет В. Н. Особенности создания и электрофизические свойства омических контактов к нитриду галлия (обзор) // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 2009. — Вып.44. — С. 41–59.
7. Воротинский В. А., Дадерко Н. К., Егоров Л. П. Надежность оптоэлектронных полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1983. — 136 с.
8. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства. — М.: Эко-Трендз, 2006. — 272 с.
9. Шляпников Н. С. Проектирование радиоэлектронных средств. Учеб. пособ. — Ульяновский Гос. тех. университет, 2001. — 127 с.
10. Чумаков В. И. К расчету деградаций в полупроводниках при импульсных перегрузках // Вестник научных трудов ХДПУ. — 2000. — Вып.93. — С.179–185.
11. Полищук А. Г., Туркин А. Н., Харитонов В. М. Исследование воздействия импульсных токовых перегрузок на мощные светодиоды. Компания ПРОСОФТ, Москва, с МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, — Электронна адреса: <http://ledcommunity.org.ru/lednews/reports/2008-07-15#h461-11>.