

Tomasz CEGIELSKI

MODELOWANIE ZJAWISKA SPADKU SPRAWNOŚCI DLA DUŻYCH GĘSTOŚCI PRĄDÓW W DIODACH ELEKTROLUMINESCENCYJNYCH Z AZOTKÓW

STRESZCZENIE *Pomimo rozwoju, który nastąpił w technologii wytwarzania białych elektroluminescencyjnych źródeł światła, w urządzeniach tych ciągle istotną ograniczającą rolę pełni zjawisko spadku sprawności generacji światła dla dużych gęstości prądu. Ponadto wciąż nierozpoznane dostatecznie są jego fizyczne podstawy. W referacie przedstawiono możliwe modele opisujące ten efekt, opierając się na dyskutowanych w literaturze hipotetycznych przyczynach: różnych rodzajach rekombinacji Augera, efektach termicznych, występowaniu silnych pól elektrycznych i asymetrii występowania nośników, itp.*

Poznanie potencjalnych powodów zjawiska spadku efektywności pozwoli na dalszy rozwój źródeł światła opartych na elektroluminescencji. Przełoży to się na niższy koszt uzyskania zamienników tradycyjnych źródeł światła i większe ich rozpowszechnienie, co w istotny sposób może ograniczyć wzrost światowego zużycia energii.

Słowa kluczowe: oświetlenie, elektroluminescencja, LED, GaN, InGaN, wewnętrzna sprawność kwantowa, studnia kwantowa, rekombinacja, spadek sprawności

mgr inż. Tomasz CEGIELSKI

e-mail: tc@niviss.com

NIVISS, Gdynia, POLAND

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 255, 2012

1. WSTĘP

Rozwój, który ostatnio nastąpił w dziedzinie wytwarzania diod elektroluminescencyjnych (ang. LED – *Light-Emitting Diode*) spowodował, że ich obszar zastosowań znacznie się rozszerzył [4]. Urządzenia, które uprzednio pełniły rolę głównie wskaźników, wkroczyły również do zastosowań ogólnooświetleniowych, osiągając sprawności zbliżone do innych wydajnych źródeł światła. Posiadają przy tym wiele zalet: długi czas życia i dużą ilość cykli włączania/wyłączania, łatwość sterowania, niewielkie rozmiary, dostępność w wielu barwach czy brak niepożądanych składowych widma.

Wszystko to się stało możliwe dzięki wynalezieniu pod koniec ubiegłego wieku białych LED-ów opartych na studni kwantowej z azotków, w których generowane światło niebieskie miesza się z powstałym w fosforze światłem żółtym [16]. Blisko dwadzieścia lat prac nad ich rozwojem przyniosło taki wzrost sprawności, że są one z powodzeniem stosowane jako zamienniki tradycyjnych źródeł światła [1].

Pomimo tych osiągnięć, ciągle daleko jest do teoretycznych ograniczeń ogólnej sprawności i można jeszcze dokonać wiele usprawnień, szczególnie w zakresie wewnętrznej sprawności kwantowej (ang. IQE – *Internal Quantum Efficiency*). Zjawiskiem, którego przewyciężenie lub opanowanie pozwoli na największy skok technologiczny, wydaje się spadek IQE dla dużych gęstości prądu (ang. *efficiency droop*) [18]. Podczas gdy osiągalne są diody, w których dla niewielkich prądów sprawność całkowita przekracza 200 lm/W, to komercyjnie dostępne urządzenia większej mocy charakteryzują się dwukrotnie niższą sprawnością.

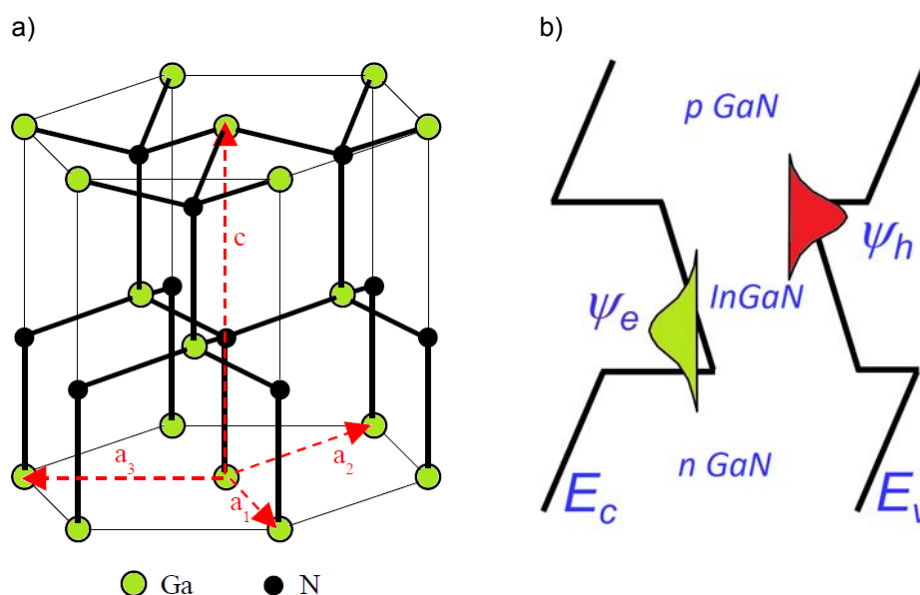
2. BUDOWA LED ZE STUDNIĄ KWANTOWĄ Z InGaN

Idealnym systemem materiałowym do konstrukcji LED-ów o krótszych długościach emitowanego światła, niż te oparte na GaAs, są azotki grupy III, czyli GaN, AlN InN. Związki te charakteryzują się prostą przerwą energetyczną, pozwalającą na wysokie prawdopodobieństwo rekombinacji promienistej. Azotki mogą krystalizować w strukturach wurcytu lub blendy cynkowej [22].

Przerwa energetyczna o szerokości odpowiedniej do generacji światła niebieskiego występuje w GaN, i ten właśnie związek jest najczęściej wykorzystywany do konstruowania białych LED-ów. Białe światło powstaje w nich przez zmieszanie niebieskiego powstałego w strukturze diody z żółtym, pows-

tałym w pobudzonym niebieskim świetłem fosforze. Istnieją również inne schematy powstawania białego światła w LED-ach, ale ten jest najbardziej ekonomiczny i stosowany najpowszechniej [21].

Naturalna dla azotku galu struktura polarna wurcytu (rys. 1a), charakteryzuje się występowaniem silnych pól piezoelektrycznych, a co za tym idzie, silnego kwantowego efektu Starka (ang. QCSE – *quantum-confined Stark effect*) [17], czyli rozdzielenia funkcji falowych dziur i elektronów (rys. 1b). Może on mieć istotny wpływ na dwa główne negatywne zjawiska występujące w LED-ach: rozważany poniżej spadek sprawności oraz tzw. zjawisko zielonej przerwy; diody emitujące zielone światło wykonane i z azotków, i z fosforków, są najmniej wydajne, podczas gdy udział tego światła w białym jest największy. W azotkach problemy z uzyskaniem dużych sprawności w generacji zielonego światła wynikają z większej szerokości przerwy, a więc i silniejszego QCSE.

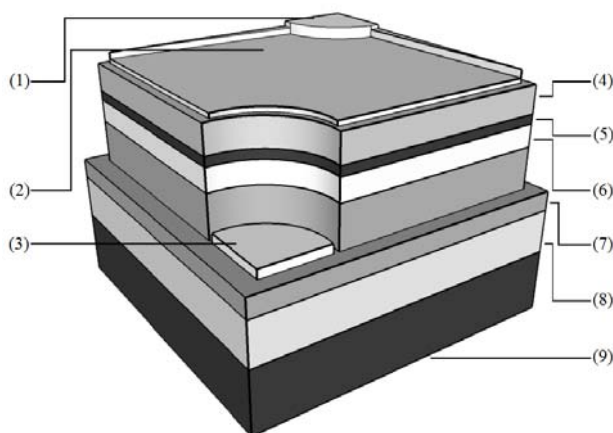


Rys. 1. a) Struktura krystaliczna wurcytu: dla kryształu wzrastanego w kierunku polarnym „c” górna strona jest galowa, a dolna azotowa; **b) poziomy energetyczny w spolaryzowanej studni kwantowej:** E_c przewodzenia i E_v walencyjne. Widoczne jest wyraźne przesunięcie względem siebie maksimów funkcji falowych elektronów Ψ_e i dziur Ψ_h

Aby ograniczyć obszar, w którym odbywa się rekombinacja, nie stosuje się złącz jednorodnych, tylko heterozłącz. Do powstania studni kwantowej z mniejszą szerokością przerwy wzbronionej, pomiędzy domieszkowane warstwy azotku galu, wprowadza się cienką warstwę stopu potrójnego InGaN.

Typowa budowa LED-a generującego niebieskie światło przedstawiona jest na rysunku 2. Rekombinacja odbywa się w regionie aktywnym, który stanowi zazwyczaj nie pojedynczą, ale wielokrotną studnię kwantową (ang. MQW –

– *Multiple Quantum Well*). Do ograniczenia upływu elektronów spowodowanego między innymi asymetrią w ilości nośników i przez nadmieniony efekt Starka, stosuje się dodatkową warstwę blokującą przepływ elektronów (ang. EBL – *Electron Blocking Layer*) pomiędzy obszarem aktywnym a domieszkowanym typu p [19].



Rys. 2. Typowa budowa LED-a ze studniami kwantowymi z InGaN:

- 1) kontakt „p”;
- 2) warstwa rozpraszająca prąd;
- 3) kontakt „n”;
- 4) p-GaN;
- 5) warstwa blokująca elektrony z AlGaN (EBL);
- 6) stos studni kwantowych z InGaN (MQW);
- 7) n-GaN;
- 8) bufor z GaN;
- 9) podłoże z szafiru lub SiC

Podłożem jest zazwyczaj szafir. Brak dobrego dopasowania struktury krystalicznej pomiędzy podłożem a azotkiem skutkuje wyjątkowo dużą ilością defektów – nawet 10^{10}cm^{-2} [22]. Ma to niewątpliwie wpływ na sprawność poprzez zwiększenie współczynnika rekombinacji niepromienistej. Stosuje się też materiały lepiej dopasowane, jak np. SiC albo też monokrystaliczny GaN. Ten ostatni, z uwagi na wysokie koszty, obecnie stosuje się komercyjnie tylko w diodach laserowych.

3. SPRAWNOŚĆ LED

Ogólna sprawność [1] lampy z elektroluminescencyjnym źródłem światła jest stosunkiem mocy optycznej opuszczającej lampę do mocy elektrycznej zasilającej ją i wyraża się w lm/W (1). Składa się na nią wiele czynników, począwszy od sprawności elektrycznej zasilacza η_{PS} , a kończąc na sprawności optycznej oprawy η_{lum} . Pozostałe składniki wzoru (2) to η_{Joule} , czyli sprawność związana ze stratami rezystancyjnymi, η_{EQE} – zewnętrzna sprawność kwantowa, η_{pho} – sprawność kwantowa fosforu i η_{λ} – sprawność konwersji długości fali w fosforze. T oznacza stosunek światła niebieskiego przenikającego poprzez fosfor do wyemitowanego z diody niebieskiej.

$$\eta = \frac{P}{UI} \quad (1)$$

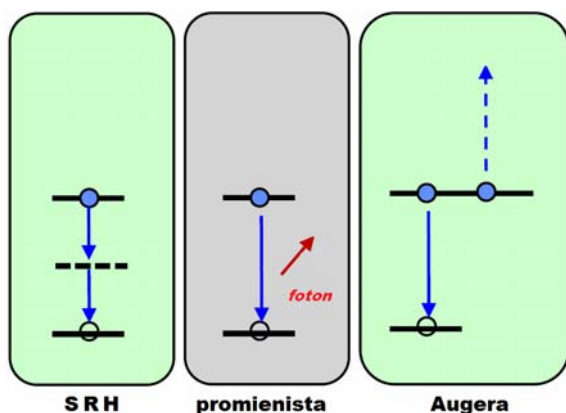
$$\eta = \eta_{PS} \times \left[\left(\eta_{Joule} \eta_{EQE} \right) T + \left(\eta_{Joule} \eta_{EQE} \right) (1-T) \eta_{pho} \eta_{\lambda} \right] \times \eta_{lum} \quad (2)$$

$$\eta_{EQE} = \eta_{inj} \eta_{IQE} \eta_{ext} \quad (3)$$

Zewnętrzna sprawność kwantowa (EQE) to stosunek ilości fotonów wyemitowanych z LED-a do ilości dostarczonych elektronów [22]. Składa się na nią wewnętrzną sprawność kwantową (IQE), współczynnik ekstrakcji η_{ext} oraz sprawność wstrzykiwania η_{inj} (niekiedy jest opisywana jako czynnik wchodzący do IQE).

4. MODELOWANIE IQE

W tym rozdziale przedstawiono wyznaczanie wewnętrznej sprawności kwantowej za pomocą modelu ABC oraz różnych jego modyfikacji. Zależność IQE od gęstości nośników N oraz od współczynników A , B i C przedstawia wzór (4). Jego mianownik opisuje rekombinację promienistą ze współczynnikiem



Rys. 3. Rodzaje rekombinacji występujące w LED. Rekombinacja Augera może też dotyczyć odwrotnej sytuacji, w której rekombinują dwie dziury z pasma walencyjnego, a nie dwa elektrony z pasma przewodzenia

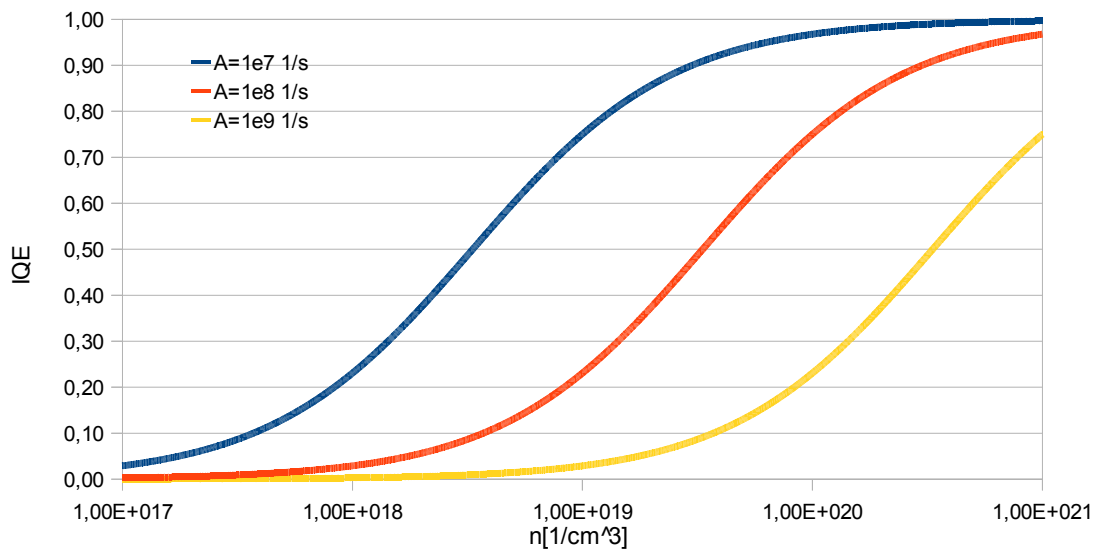
B , licznik zaś całkowitą rekombinację: promienistą oraz niepromienistą. Na tę drugą składa się rekombinacja pośrednia typu Shockley-Read-Hall (ze współczynnikiem A) zależna od ilości pułapek oraz rekombinacja typu Augera (ze współczynnikiem C), w której energia nośników wytracana jest w wyniku oddziaływania z siecią krystaliczną. Ilustracja tych rodzajów rekombinacji przedstawiona jest na rysunku 3.

$$\eta_{IQE} = \frac{BN^2}{AN + BN^2 + CN^3} \quad (4)$$

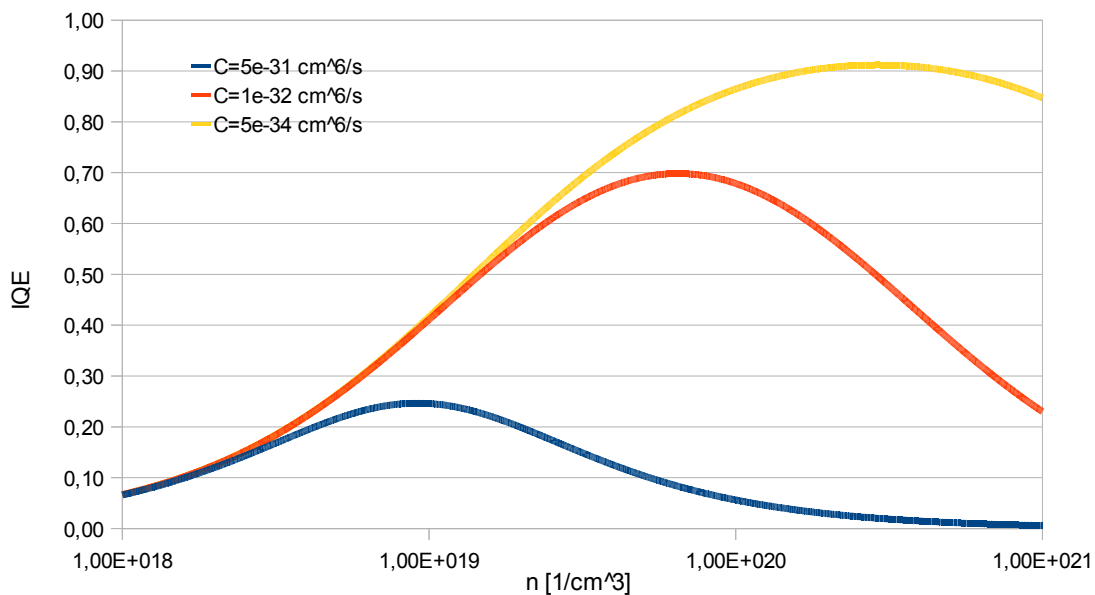
Zjawisko spadku sprawności dla dużej gęstości prądu („droop”) objawia się występowaniem maksimum na wykresie IQE w funkcji gęstości nośników. Zazwyczaj maksimum to występuje dla wartości rzędu 10^{19} cm^{-3} , co odpowiada

gęstości prądu kilkadziesiąt A/cm^2 . Ciągłe nie ma zgodności co do natury tego zjawiska i prowadzona jest na ten temat szeroka debata [18, 25, 26].

Rysunek 4 przedstawia IQE dla założonego braku rekombinacji Augera – $C = 0$. Funkcja jest monotoniczna i zmierza do 100%. Od współczynnika A zależy tylko poziom sprawności dla danej ilości nośników, czyli jakość LED-a. Rekombinacja typu SHR jest silnie zależna od jakości użytych materiałów i temperatury [15].



Rys. 4. Wewnętrzna sprawność kwantowa w funkcji gęstości nośników:
dla $B = 3e-12$ cm^3/s , $C = 0$, A od $1e7$ 1/s do $1e9$ 1/s



Rys. 5. Wewnętrzna sprawność kwantowa w funkcji gęstości nośników:
dla $A = 4,2e7$ 1/s, $B = 3e-12$ cm^3/s , C od $5e-34$ cm^6/s do $5e-31$ cm^6/s

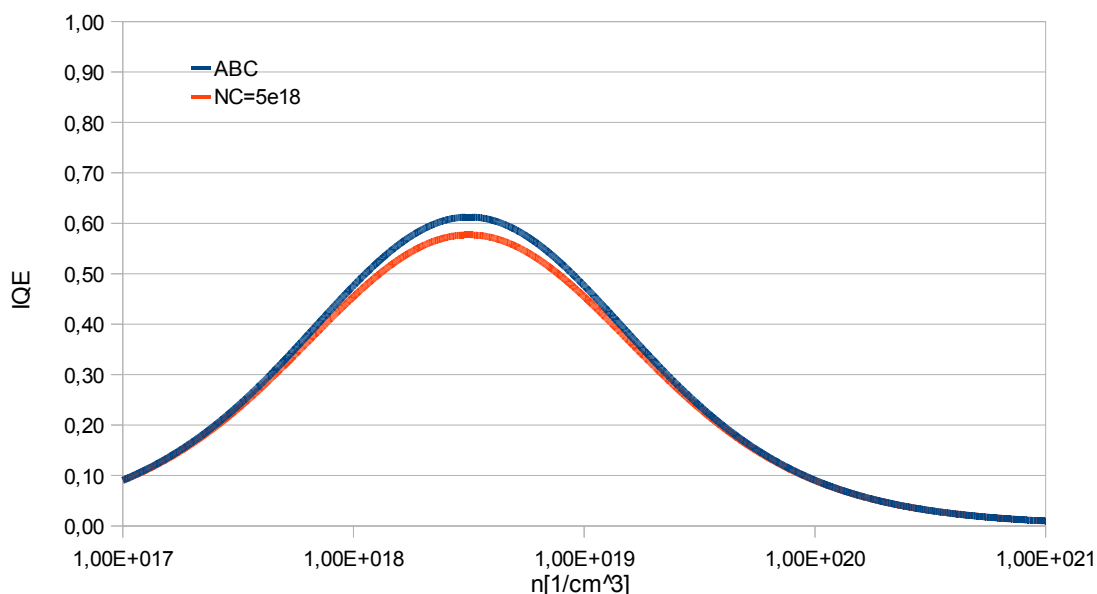
Wprowadzenie czynnika odpowiadającego rekombinacji Augera powoduje wystąpienie na wykresie IQE maksimum. Powyżej pewnej gęstości nośników sprawność zaczyna spadać (rys. 5). Z tego względu rekombinacja Augera uważana jest za jedną z głównych przyczyn zjawiska „droop” [9].

Dokładniejsze badania wykazały jednak, że nie jest to wystarczające wyjaśnienie [20]. Pomiary wykazały, że rzeczywista charakterystyka IQE nie jest symetryczna jak dla modelu *ABC*, tylko spadek sprawności po maksimum jest szybszy od narastania przed [6].

Wprowadzanie do modelu *ABC* zależności współczynników rekombinacji od gęstości nośników [8, 24], odpowiadającego zjawisku wypełniania przestrzeni fazowej (ang. *phase space filling*) [7], również nie powoduje asymetrii wykresu IQE [5]. Na rysunku 6 przedstawione jest porównanie charakterystyki dla modelu *ABC* oraz zmodyfikowanego przez wprowadzenie wzorów (5) i (6), w których B_0 i C_0 odpowiadają współczynnikom rekombinacji bez uwzględnienia tego zjawiska, a N_c decyduje o jego sile.

$$B = \frac{B_0}{1 + \frac{N}{N_c}} \quad (5)$$

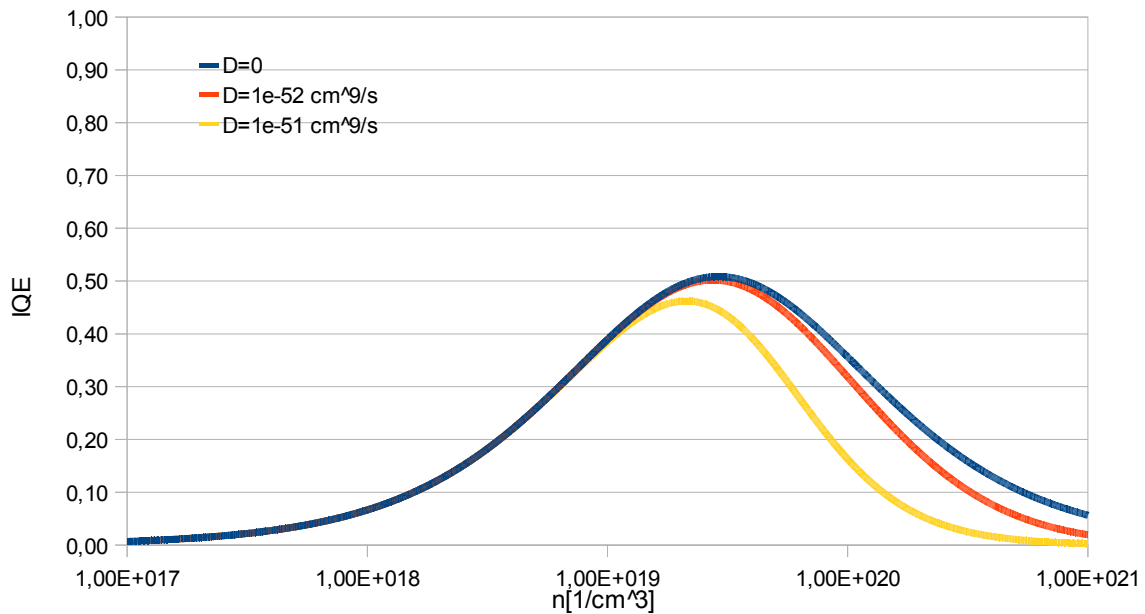
$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{N}{N_c}} \quad (6)$$



Rys. 6. Wewnętrzna sprawność kwantowa w funkcji gęstości nośników: dla $A = 1e7$ 1/s, $B = 1e-11$ cm³/s, $C = 1e-30$ cm⁶/s. Linia niebieska bez wypełniania przestrzeni fazowej, czerwona z wypełnianiem przestrzeni fazowej o wartości współczynnika $N_c = 5e18$ 1/cm⁻³

Dopiero wprowadzenie wyrazu proporcjonalnego do 4 potęgi gęstości nośników (7) powoduje wprowadzenie asymetrii. Wartość współczynnika D decyduje o jej stopniu (rys. 7). Fizycznie może za ten wyraz odpowiadać np. upływ nośników [5, 19] lub asymetria w transporcie elektronów i dziur [14].

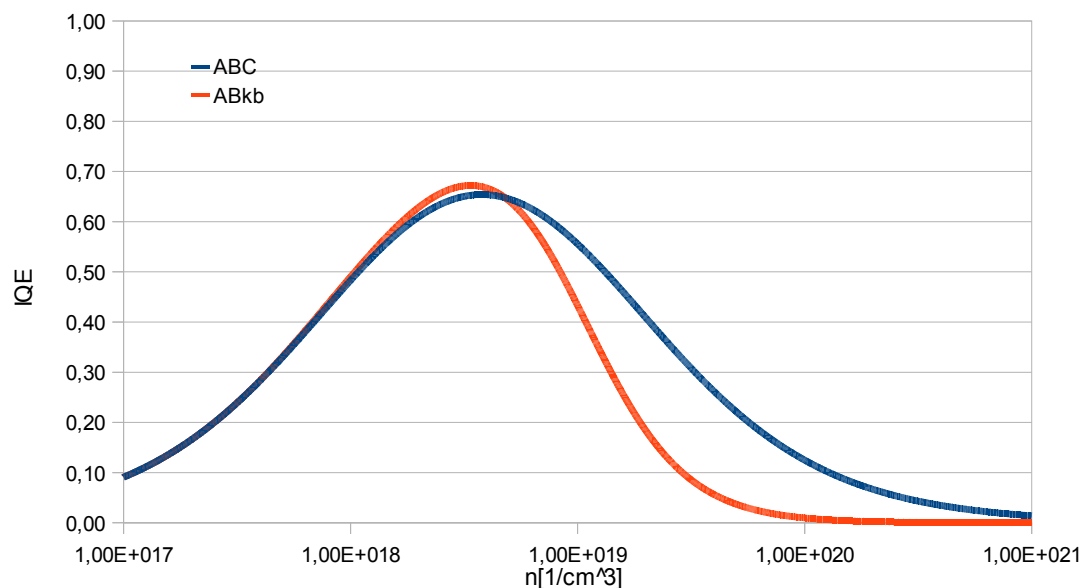
$$\eta_{IQE} = \frac{BN^2}{AN + BN^2 + CN^3 + DN^4} \quad (7)$$



Rys. 7. Wewnętrzna sprawność kwantowa w funkcji gęstości nośników: dla $A = 4,2e7$ 1/s, $B = 3e-12$ cm³/s, $C = 5e-32$ cm⁶/s, D od 0 do $1e-52$ 1/cm³

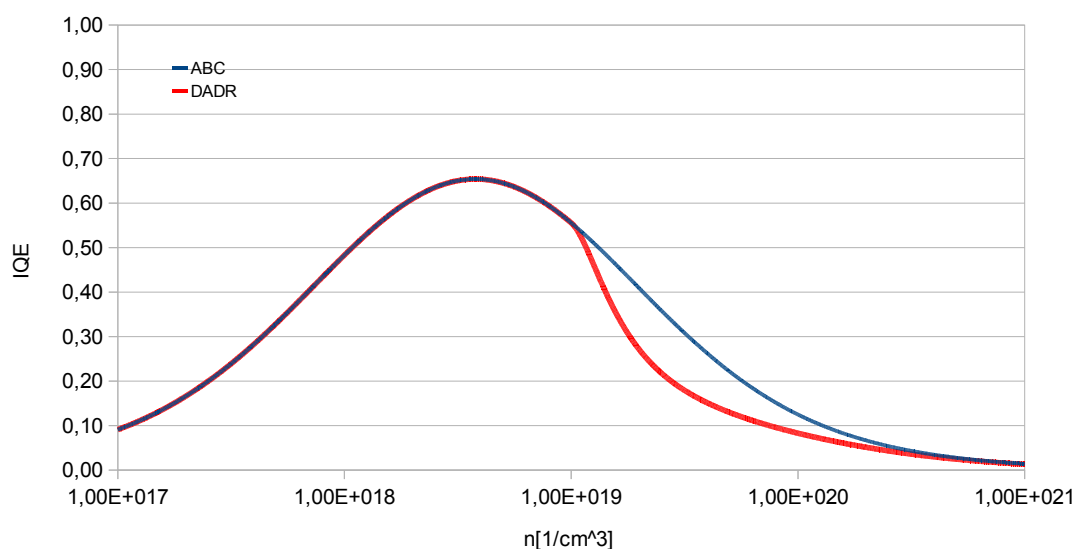
Podobny efekt może być uzyskany w inny sposób. Asymetrię w charakterystyce IQE uzyskano w przypadku zaimplementowania efektu upływu nośników (ang. *carrier spillover*) [18]. Sumę rekombinacji promienistej i niepromienistej uzupełniono o dodatkowy wyraz odpowiadający za to zjawisko (8). Jest on proporcjonalny do potęgi b sumy rekombinacji SHR, promienistej i Augera oraz do współczynnika k . Na rysunku 8 przedstawione jest porównanie IQE dla modelu ABC i dla modelu z efektem *carrier spillover* bez uwzględnienia rekombinacji Augera.

$$\eta_{IQE} = \frac{BN^2}{AN + BN^2 + CN^3 + k(AN + BN^2 + CN^3)^b} \quad (8)$$



Rys. 8. Wewnętrzna sprawność kwantowa w funkcji gęstości nośników: dla $A = 1e7$ 1/s, $B = 1e-11$ cm^3/s , $C = 7e-31$ cm^6/s , $k = 1e-27$, $b = 2$. Linia niebieska dla modelu ABC, linia czerwona z dodanym efektem *carrier spillover*

Ostatnim przedstawionym modelem jest modyfikacja modelu ABC modelująca zjawisko rekombinacji aktywowanej gęstością nośników (ang. *Density-Activated Defect Recombination* – DADR) [10, 24]. Powyżej pewnej gęstości nośników N_0 dodawany jest kolejny składnik rekombinacji całkowitej – R_{DADR} , który jest zależny od N (9), (10). Uzyskany w ten sposób wykres IQE w funkcji gęstości nośników (rys. 9) też charakteryzuje się asymetrią, mogącą odpowiadać za efekt „droop”.



Rys. 9. Wewnętrzna sprawność kwantowa w funkcji gęstości nośników: dla $A = 1e7$ 1/s, $B = 1e-11$ cm^3/s , $C = 7e-31$ cm^6/s , $k = 1e-27$, $b = 2$.

Linia niebieska dla modelu ABC, linia czerwona z dodanym efektem DADR

$$\eta_{IQE} = \frac{BN^2}{AN + BN^2 + CN^3 + R_{DADR}} \quad (9)$$

$$R_{DADR} = 0 \quad \text{dla } N < N_0 \quad (10)$$

$$R_{DADR} = \frac{D_{DADR}(N - N_0)}{2N_0} \quad \text{dla } N \geq N_0$$

5. PODSUMOWANIE

Prezentowany model *ABC* jest powszechnie stosowany do opisu zjawisk związanych z rekombinacją w diodach elektroluminescencyjnych [13]. Niestety, dla diod wykonanych z azotków, które są podstawą oświetlenia za pomocą ciał stałych (ang. *Solid State Lighting* – SSL), nie jest wystarczający. Szczególnie nie sprawdza się dla większych gęstości prądów, które są niezbędne do uzyskania ekonomicznych rozwiązań. Alternatywą jest wyznaczanie modeli z hamiltonianów opisujących zjawiska kwantowe [3] lub stosowanie komercyjnych symulatorów [2, 12, 14].

W referacie przedstawiono możliwe rozwinięcia modelu *ABC*, które lepiej odwzorowują zjawisko spadku sprawności dla dużych gęstości prądów. Nie ma zgody co do fizycznych przyczyn tego zjawiska i stosowane współczynniki potrzebują identyfikacji z rzeczywistymi stałymi i wartościami.

Mimo braku zgody co do przyczyny samego zjawiska *droop*, udaje się uzyskiwać diody elektroluminescencyjne o coraz mniejszej jego skali. Największe nadzieje dają prace zmierzające do zmniejszenia pól piezoelektrycznych w obszarze aktywnym: przez zmiany struktury kryształu, w wyniku innego niż polarnego kierunku narastania, np. semi-polarnego [27] lub niepolarnego, lub przez wprowadzanie dodatkowych warstw zmniejszających polaryzację. Wielki postęp może też przynieść opracowanie taniej technologii wytwarzania podłoży z monokrystalicznego azotku galu. Inne obiecujące prace dotyczą wykorzystania struktur trójwymiarowych zamiast planarnych [27] lub odpowiedniego poszerzenia studni kwantowych [9, 23].

Dokładne poznanie zjawisk i zależności występujących w obszarze aktywnym LED-ów ze studniami kwantowymi z azotków pozwoli na szybszy rozwój tego typu źródeł światła. Spowoduje to spadek ceny wydajnych lamp

SSL i ich rozpowszechnienie, a co za tym idzie poważne ograniczenie wzrostu światowego zapotrzebowania na energię [1].

LITERATURA

1. Acevedo I.L., Morgan G., Morgan F.: The Transition to Solid-State Lighting, Proceedings of the IEEE, vol. 97, No. 3, s. 481-510, 2009.
2. Bogdanov M.V. i inni: Current crowding effect on light extraction efficiency, Phys. Stat. Solidi (c) 7, No 7-8, s. 2124-2126, 2010.
3. Chow W.W.: Modeling excitation-dependent bandstructure effects on InGaN light-emitting diode efficiency, Opt. Express 19, s. 21818-21831, 2011.
4. Crawford M.H.: LEDs for Solid-State Lighting: Performance Challenges and Recent Advances, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 15, No. 4, s. 1028-1040, 2009.
5. Dai Q. i inni: Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 97, 133507, 2010.
6. Dai Q. i inni: On the symmetry of efficiency-versus-carrier-concentration curves in GaInN/GaN light-emitting diodes and relation to droop-causing mechanisms, Appl. Phys. Lett. 98, 133507, 2011.
7. David A., Grundmann M.J.: Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis, Appl. Phys. Lett. 96, 103504, 2010.
8. David A., Grundmann M.J.: Influence of polarization fields on carrier lifetime and recombination rates in InGaN-based light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 97, 033501, 2010.
9. Ding K. i inni: A wide-narrow well design for understanding the efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes, Appl Phys B 97, s. 465-468, 2009.
10. Hader J., Moloney J.V., Koch S.W.: Density-activated defect recombination as a possible explanation for the efficiency droop in GaN-based diodes, Appl. Phys. Lett. 96, 221106, 2010.
11. Kim M-H.: Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 91, 183507, 2007.
12. Kisin M.V., El-Ghoroury H.S.: Modeling of injection characteristics of polar and nonpolar III-nitride multiple quantum well structures, J. Appl. Phys. 107, 103106, 2010.
13. Lee J-M., Kim S-B.: Analysis of Current Components and Estimation of Internal Quantum Efficiency in Light-Emitting Diodes, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 58, No. 9, s. 3053-3057, 2011.
14. Meyaard D.S. i inni: Asymmetry of carrier transport leading to efficiency droop in GaInN based light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 99, 251115, 2011.
15. Meyaard D.S. i inni: On the temperature dependence of electron leakage from the active region of GaInN/GaN light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 99, 041112, 2011.
16. Narukawa Y.: White-light LEDs, Opt. Photon. News 15, s. 24-29. 2004.
17. Niu L. i inni: Improving the emission efficiency of MBE-grown GaN/AlN QDs by strain control, Nanoscale Research Letters, 6:611, 2011.
18. Ozgur U. i inni.: GaN-Based Light-Emitting Diodes: Efficiency at High Injection Levels, Proceedings of the IEEE, vol. 98, No: 7, s. 1180-1196, 2010.

19. Piprek J., Li S.: Electron leakage effects on GaN based light emitting diodes, Opt Quant Electron vol. 42, s. 89-95, 2011.
20. Ryu H-Y., Kim H-S., Shim J-I.: Rate equation analysis of efficiency droop in InGaN light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 95, 081114, 2009.
21. Schubert E.F., Kim J.K.: Solid-state light sources getting smart, Science 308, s. 1274-1278, 2005.
22. Schubert E.F.: Light-Emitting Diodes, Second Edition, Cambridge Univ. Press, New York, 2006.
23. Schubert M.F. i inni: Polarization-Matched GaInN/AlGaInN Multi-Quantum-Well Light-Emitting Diodes With Reduced Efficiency Droop, Appl. Phys. Lett. 93, 041102, 2008.
24. Shim J-I., Kim H., Shin D-S.: An Explanation of Efficiency Droop in InGaN-based Light Emitting Diodes: Saturated Radiative Recombination Rate at Randomly Distributed In-Rich Active Areas, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 58, No. 3, s. 503-508, 2011.
25. Stevenson R.: The LED's Dark Secret, IEEE Spectrum, 08.09, s. 23-27, 2009.
26. Stevenson R.: Explaining leds diminishing returns, IEEE Spectrum, 11.11, s. 16, 2011.
27. Wunderer T. i inni: Three-dimensional GaN for semipolar light emitters, Phys. Status Solidi B, 248, No. 3, s. 549-560, 2011.

Rękopis dostarczono dnia 19.03.2012 r.

MODELING OF EFFICIENCY DROOP EFFECT IN GaN LEDS

Tomasz CEGIELSKI

ABSTRACT *Despite the development that occurred in the technology of white Light-Emitting Diodes, these devices are still limited by the phenomenon of the efficiency droop that occurs in light generation for large current densities. Moreover, its physical basis is still not sufficiently recognized. The paper presents possible models describing this effect, based on the hypothetical reasons discussed in the literature: different types of Auger recombination, thermal effects, the presence of strong electric fields and the occurrence of the asymmetry of carriers, etc.*

Knowing the potential reasons for the droop phenomenon will allow the further development of Solid State Light sources. This leads to lower cost retrofits or replacements of traditional light sources and greater their market penetration, which may significantly reduce global energy consumption increase.

Keywords: *Solid State Lighting, LED, GaN, InGaN, Internal Quantum Efficiency, Quantum Well, Recombination, Efficiency Droop*