

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ III-НИТРИДОВ

С.С. Суслов^{1*}, К.А. Виноградова², В.Е. Бугров^{1,3}, М.А. Одноблюдов¹, А.Е. Романов¹⁻³

¹ Группа компаний «Оптоган», Таллинское шоссе 206, Санкт-Петербург, 198205, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,

ул. Политехническая 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,

Кронверкский пр. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

*e-mail: sergey.suslov@optogan.com

Аннотация. Рассматривается задача параметрической оптимизации свойств нитридного светоизлучающего чипа в рамках самосогласованного электро–тепло–светового подхода. Представляются рассчитанные зависимости мощности излучения, КПД чипа, картины растекания тока при контролируемых изменениях в геометрии электродов. Решение задачи оптимизации предсказывает более 8 % прирост КПД устройства. Моделирование выполнено с использованием оригинального программного обеспечения, основанного на методе конечных объемов и методе трассировки лучей.

1. Введение

Роль светодиодов в общем освещении становится все более очевидной [1-3]. Дальнейший прогресс в этом направлении требует проведения новых фундаментальных и прикладных исследований в области физики и технологии светодиодных устройств [2, 4]. Для уменьшения числа дорогостоящих и длительных экспериментов разумно использовать аналитические и численные методы моделирования процессов изготовления и эксплуатации светодиодов [2, 4]. Важнейшей задачей в этой области является модельный анализ влияния формы электродов на растекание тока в светодиодном чипе и на вывод излучения из него. Обещающие результаты на пути решения данной задачи были получены в течение последнего десятилетия [5–13]. Например, Ebong и др. [5] и Hwang и др. [6] представили трехмерную (3D) модель численного анализа светодиодного чипа и проанализировали различные геометрические формы электродов. Всестороннее исследование геометрии контакта в светодиоде, выращенном на изолирующей подложке, представлено Sheu и др. [7]. Позднее Chen и др. [8] провели электрооптический анализ GaN светодиодных чипов, используя метод трассировки лучей. Исследование зависимости тепловых и электрических свойств от размера площади p–контакта в вертикальных чипах высокой мощности, созданных на основе GaN, проведенное Hwu и др. [9], показало, что увеличение этой площади значительно сокращает потребляемую мощность и нагрев устройства, но в то же время, уменьшает КПД светодиода из-за высоких потерь света. В последнее время, сообщалось о смешанном электро–тепло–световом моделировании светодиодов [11-13]. Богданов и др. изучили вертикальный чип, рассчитанный на

Решением циклического расчета является достижение постоянных значений рассчитываемых величин — падения напряжения на активной области, мощности излучения, картины растекания тока и тепла.

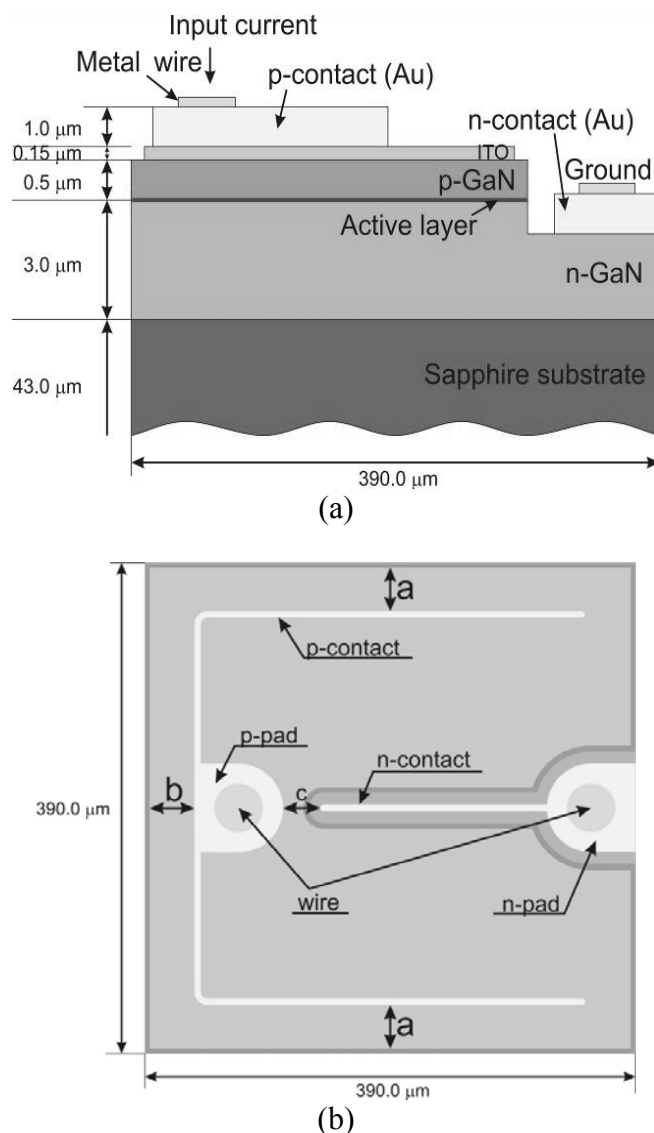


Рис. 1. Схематичное изображение светодиодного чипа GaN:
 (а) вид сбоку; указанные значения использованы в моделировании;
 (б) вид сверху: a , b , c – параметры, изменяемые при моделировании.

В Таблице I даются значения используемых в моделировании параметров материалов.

Определение растекания тока в слоях, за исключением активной области, осуществляется на основе закона Ома:

$$\sigma \cdot E = J. \quad (1)$$

Здесь σ — удельная электрическая проводимость, E — напряженность поля, J — плотность тока. Удельная электрическая проводимость σ связана со слоевым сопротивлением r_l и контактным сопротивлением r_c выражениями $\sigma = 1/(r_l \cdot t_l)$ и

Источником тепла в каждой ячейке сетки моделирования является сумма мощности тепловых потерь согласно закону Джоуля–Ленца и мощности поглощенного слоями материала света. Нагрев активного слоя вычисляется из следующего уравнения:

$$Q_{actj} = V_{actj} \cdot I_{actj} - P_{radj}, \quad (5)$$

где P_{radj} — мощность сгенерированного светового излучения.

Граничным условием является также значение теплового потока, удаляемого с нижней поверхности сапфировой подложки $Q_{sapphire} = \alpha \cdot (T_{env} - T_j)$, где $\alpha = 40000 \text{ W/m}^2\text{K}$ [9] — коэффициент теплоотдачи и $T_{env} = 293 \text{ K}$ — комнатная температура.

Метод трассировки лучей применяется для моделирования вывода светового излучения на той же сетке, на которой решаются уравнения переноса заряда и переноса тепла. Лучи запускаются из активной области с энергиями, которые определяются из уравнения [2]:

$$P_{radj} = \eta_{int} \cdot J_{actj} \cdot hv/q, \quad (6)$$

где $hv = 2.73 \text{ eV}$ — энергия фотона, q — элементарный заряд, $\eta_{int} = 0.8$ — внутренняя квантовая эффективность, J_{actj} — плотность тока в ячейке j активного слоя.

Потери мощности лучей света вычисляются из закона Бугера–Ламберта–Бера:

$$P = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot l), \quad (7)$$

где P_0 — начальная мощность луча, которая получена из (5), α — коэффициент поглощения, l — расстояние, которое проходит свет через материал. В каждой ячейке сетки моделирования энергия поглощенных лучей учитывается в источнике тепла. Прозрачный проводящий слой ИТО смоделирован как плоскость со смешанной рассеивающей схемой: 50 % света отражается и преломляется по законам Френеля и 50 % света рассеивается по закону косинуса Ламберта. Нижняя поверхность сапфира принимается в качестве зеркала с отражательной способностью в 90 %. Металлические контакты в разработанной модели представляются в виде абсолютных поглотителей света, в других вариантах модели возможно рассмотрение отражающих контактов.

3. Моделирование и результаты

Оптимизация геометрии контакта начиналась с параметра a при фиксированных параметрах $b = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $c = 60 \text{ }\mu\text{m}$. На Рис. 2 кружками предоставляются зависимости КПД светодиодного чипа, определяемый из выражения $WPE = P_{ext} / (V_a I_a)$ (*wall plug efficiency*), и мощности излучения в зависимости от расстояния a . При сближении полос р- и п-контакта мощность излучения P_{ext} достигает максимального значения на расстоянии $a = 65 \text{ }\mu\text{m}$ благодаря меньшему количеству потерь света на поверхности р-контакта, в то время как максимум КПД наблюдается при $a = 75 \text{ }\mu\text{m}$. Причина, по которой КПД имеет максимум при $a = 75 \text{ }\mu\text{m}$, а не при $a = 65 \text{ }\mu\text{m}$, можно объяснить более высокой скоростью падения прямого напряжения по сравнению со скоростью изменения выхода света. На Рис. 3 демонстрируется картина растекания тока: при $a = 5 \text{ }\mu\text{m}$ (Рис. 3а) имеет место значительное сгущение тока под металлическими токоведущими полосками р-контакта, что является причиной более низкого вывода света, по сравнению с картиной растекания тока при $a = 65 \text{ }\mu\text{m}$ (Рис. 3б).

На основании графиков Рис. 2 оптимальным значением параметра a считается $65 \mu\text{m}$. Изменения в характеристиках чипа, связанные с параметром b при фиксированном значении $a = 65 \mu\text{m}$, изображены на Рис. 2 треугольниками. Возрастание расстояния b приводит к увеличению вывода света за счет того, что ток частично выводится из-под площадки р-контакта, но в то же самое время быстро растет напряжение, что негативно сказывается на КПД. Оптимальным значением b выбирается $25 \mu\text{m}$.

С уменьшением расстояния c (на Рис. 2 зависимости WPE и P_{ext} от расстояния c обозначены квадратами) увеличивается мощность излучения чипа, но при этом скорость роста напряжения выше. Поэтому КПД чипа последовательно уменьшается с ростом расстояния c . Оптимальным значением параметра c выбирается $75 \mu\text{m}$, что соответствует более однородному распределению тока.

4. Заключение

Таким образом, при заданных граничных условиях и параметрах материалов структуры чипа, оптимальной формой электродов является форма со значениями параметров моделирования чипа: $a = 65 \mu\text{m}$, $b = 25 \mu\text{m}$, $c = 75 \mu\text{m}$. Для рассмотренной геометрии электродов размещение полос р-контакта вдали от краев чипа является предпочтительным для лучшего растекания тока. Также можно порекомендовать следующее: полоса п-контакта должна быть близко расположена к площадкам р-контакта для уменьшения удельного сопротивления чипа, или же, полоса п-контакта может быть сделана более короткой для увеличения вывода света.

Тенденции характеристик, которые демонстрируются на Рис. 2 и Рис. 3а,б, свидетельствуют о том, что выполнение трехмерного самосогласованного электро-тепло-светового моделирования является важным инструментом для того, чтобы найти оптимальную форму электродов. В частном случае желание уменьшить только прямое напряжение или увеличить только выход света путем изменения формы электродов не обязательно приведет к росту КПД. Важно, что расчеты следует выполнять при фиксированных электрических, тепловых и оптических параметрах чипа для того, чтобы оценить влияние изменения только геометрии контактов на расчетные характеристики.

Можно ожидать, что в случае работы чипов на более высоких токах, роль геометрии электродов станет еще более значимой. Таким образом, оптимизация контактов является необходимым условием для проектирования качественных, эффективных и надежных светодиодных устройств, тем более что при оптимизировании работы программы на основе задаваемых электрических и световых параметров можно будет рассчитывать наилучшую форму электродов.

Авторы благодарят профессора О.В. Константинова за полезные обсуждения полученных результатов, а также вопросов, связанных с теоретическим анализом эффекта падения световой эффективности «droop effect» в светодиодных полупроводниковых структурах.

Литература

- [1] E.F. Schubert, J.K. Kim // *Science* **308** (2005) 1274.
- [2] E.F. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, UK, 2006).
- [3] R. Haitz, J.Y. Tsao // *Physica Status Solidi A* **208** (2011) 17.
- [4] A.I. Zhmakin // *Physics Reports* **498** (2011) 189.
- [5] A. Ebong, S. Arthur, E. Downey, X.A. Cao, S. LeBoeuf, D.W. Merfeld // *Solid-State Electronics* **47** (2003) 1817.

- [6] S. Hwang, J. Shim // *IEEE Transactions Electron Devices* **55(5)** (2008) 1123.
- [7] G.J. Sheu, F.S. Hwu, J.C. Chen, J.K. Sheu, W.C. Lai // *Journal of the Electrochemical Society* **155(10)** (2008) H836.
- [8] J.C. Chen, G.J. Sheu, F.S. Hwu, H.I. Chen, J.K. Sheu, T.X. Lee, C.C. Sun // *Optical Review* **16** (2009) 213.
- [9] F.S. Hwu, J.C. Chen, S.H. Tu, G.J. Sheu, H.I. Chen, J.K. Sheu // *Journal of the Electrochemical Society* **157(1)** (2010) H31.
- [10] S. Huang, H. Wu, B. Fan, B. Zhang, G. Wang // *Journal of Applied Physics* **107** (2010) 054509.
- [11] M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, I.Yu. Evstratov, M.S. Ramm, S.Yu. Karpov // *Physica Status Solidi C* **7** (2010) 2123.
- [12] P. Wang, W. Wei, B. Cao, Z. Gan, S. Liu // *Optic & Laser Technology* **42** (2010) 737.
- [13] M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, I.Yu. Evstratov, A.I. Zhmakin, S.Yu. Karpov // *Semiconductor Science and Technology* **23** (2008) 125023.
- [14] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Pearson Education Limited, England, 2007).

PARAMETRIC MODELING OF LIGHT EMITTING STRUCTURES BASED ON III-NITRIDES

S.S. Suslov^{1*}, K.A. Vinogradova², V.E. Bougrov^{1,3}, M.A. Odnoblyudov¹, A.E. Romanov¹⁻³

¹Optogan Group, Tallinskoe shosse 206, St. Petersburg, 198205, Russia

²Ioffe Physical Technical Institute RAS, Polytekhnicheskaya 26, St. Petersburg, 194021, Russia

³St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
Kronverkskiy pr. 49, St. Petersburg, 197101, Russia

*e-mail: sergey.suslov@optogan.com

Abstract. We consider the task of parametric optimization of the properties for nitride semiconductor light emitting chip. The solution is given in the framework of the self-consistent electrical/thermal/optical approach. Dependences of radiation power, chip wall plug efficiency (WPE) and current spreading are presented for varying geometry of chip electrodes. The optimization procedure predicts more than 8 % increase in WPE. Original software based on finite volume and ray tracing analysis was used in simulation.

References

- [1] E.F. Schubert, J.K. Kim // *Science* **308** (2005) 1274.
- [2] E.F. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, UK, 2006).
- [3] R. Haitz, J.Y. Tsao // *Physica Status Solidi A* **208** (2011) 17.
- [4] A.I. Zhmakin // *Physics Reports* **498** (2011) 189.
- [5] A. Ebong, S. Arthur, E. Downey, X.A. Cao, S. LeBoeuf, D.W. Merfeld // *Solid-State Electronics* **47** (2003) 1817.
- [6] S. Hwang, J. Shim // *IEEE Transactions on Electron Devices* **55(5)** (2008) 1123.
- [7] G.J. Sheu, F.S. Hwu, J.C. Chen, J.K. Sheu, W.C. Lai // *Journal of the Electrochemical Society* **155(10)** (2008) H836.

- [8] J.C. Chen, G.J. Sheu, F.S. Hwu, H.I. Chen, J.K. Sheu, T.X. Lee, C.C. Sun // *Optical Review* **16** (2009) 213.
- [9] F.S. Hwu, J.C. Chen, S.H. Tu, G.J. Sheu, H.I. Chen, J.K. Sheu // *Journal of the Electrochemical Society* **157(1)** (2010) H31.
- [10] S. Huang, H. Wu, B. Fan, B. Zhang, G. Wang // *Journal of Applied Physics* **107** (2010) 054509.
- [11] M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, I.Yu. Evstratov, M.S. Ramm, S.Yu. Karpov // *Physica Status Solidi C* **7** (2010) 2123.
- [12] P. Wang, W. Wei, B. Cao, Z. Gan, S. Liu // *Optic & Laser Technology* **42** (2010) 737.
- [13] M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, I.Yu. Evstratov, A.I. Zhmakin, S.Yu. Karpov // *Semiconductor Science and Technology* **23** (2008) 125023.
- [14] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Pearson Education Limited, England, 2007).