

УДК 621.315.592

М.Н. Романовский, С.Г. Еханин

Методика расчета теплопереноса в светоизлучающих диодах на основе GaN

Представлены электрическая и тепловая двумерные распределенные модели светоизлучающих диодов с мелким приповерхностным дефектом треугольной и прямоугольной формы. Приведены обсуждения полученных результатов.

Ключевые слова: сверхъяркие светоизлучающие диоды на основе GaN, модели и расчеты теплопереноса, температурные поля.

Приборы на основе нитрида галлия являются в настоящее время наиболее перспективными для создания осветительных ламп благодаря большой ширине запрещенной зоны и высокой теплопроводности. Эти свойства обеспечивают возможность повышения рабочих токов, допустимой рабочей температуры и получение большой яркости света. Вместе с тем стремление к дальнейшему повышению выхода светового потока неизбежно приводит к увеличению прямого тока через кристалл полупроводника и, как следствие, увеличению тепловыделения. Кроме того, при больших плотностях тока начинают сказываться и доминировать дополнительные факторы, которые и снижают эффективность работы такой системы: последовательное сопротивление, безызлучательная рекомбинация, неравномерность плотности тока по объему кристалла, локальный перегрев [1–3].

Прогресс в развитии полупроводниковой электроники сопровождается разработкой и внедрением средств автоматизированного проектирования полупроводниковых изделий, основой которых являются математические модели структурно-конструкционных элементов полупроводниковых изделий (ППИ) и физических процессов в них. Наиболее важными и вместе с тем наиболее сложными процессами, определяющими функциональные свойства, предельные режимы работы и надежность ППИ, являются теплоэлектрические процессы в приборных полупроводниковых структурах. Существуют пакеты прикладных программ для проектирования тепловых режимов ППИ (SPICE, TERM3, ANSYS, COMSOL и др.). Эти пакеты программ и заложенные в них модели позволяют рассчитывать температурные поля при заданном распределении источников тепла и граничных условиях, но не учитывают действия различных механизмов теплоэлектрической обратной связи и наличия электрофизических и теплофизических дефектов в структурах ППИ [4].

Представляет интерес разработка моделей ППИ, учитывающих такое взаимное влияние. Для светодиодных гетероструктур AlGaInN такая задача особенно актуальна ввиду повышенного содержания неоднородностей (дефектов) в таких структурах [5]. Кроме того, компьютерные модели соответствующих подсистем светоизлучающих диодов (СИД) полезны и для лучшего понимания функционирования, и для оптимизации параметров эксплуатации СИД.

Модель электрической подсистемы. Классическая математическая модель полупроводниковой структуры в электрическом аспекте – уравнения непрерывности (1), (2), переноса (3), (4) и Пуассона (5) [6, 7]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} j_p + g_p; \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} j_n + g_n; \quad (2)$$

$$j_p = q(-\mu_p p \operatorname{grad} U - D_p \operatorname{grad} p); \quad (3)$$

$$j_n = q(-\mu_n n \operatorname{grad} U + D_n \operatorname{grad} n); \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} U = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (5)$$

где q – заряд электрона; j_p и j_n – плотности дырочного и электронного токов; p и n , g_p и g_n , μ_p и μ_n , D_p и D_n – концентрации, скорости процессов генерации – рекомбинации, подвижности, коэффициенты

диффузии дырок и электронов соответственно; E – вектор напряженности электрического поля; ρ – плотность объемного заряда (включая спонтанную поляризацию [6, 7]); ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Краевые условия включают: начальные условия – распределение зависимых переменных по объему кристалла в момент времени $t = 0$, граничные условия – значения зависимых переменных на границах рассматриваемой полупроводниковой области. Искомые переменные – p, n, U (или E).

Трехмерное численное моделирование субмикронных тонкослойных сильнолегированных полупроводниковых структур требует больших вычислительных ресурсов. Первый способ упрощения задач – переход к одно- или двумерным моделям. Второй способ – макро моделирование.

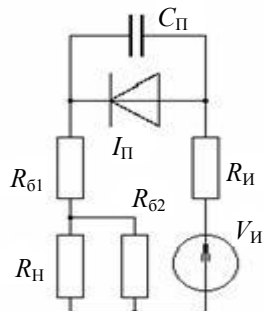


Рис. 1. Схема замещения диодной структуры с дефектом в базовой области

Макромодели формируются для некоторых типовых структур (или отдельных участков структур) полупроводниковых элементов в результате приближенного аналитического решения уравнений, входящих в исходную систему (1)–(5). Предельный случай макро модели диодной структуры (модели на макроуровне [8]) приведен в [9], где схема замещения составлена из двухполюсника, управляемого напряжением источника тока I_p (с диодной характеристикой), сопротивления диода $R_б$ при прямом смещении (сопротивления базы), емкости C_p p - n -перехода.

Предположим, что в базе СИД присутствует протяженная область повышенной или пониженной электропроводности (дефект), ориентированная в плоскости p - n -перехода. Эквивалентная схема электрической модели такой структуры показана на рис. 1. Сопротивление $R_н$ моделирует область базы, в которой происходит растекание тока, $R_б1$ и $R_б2$ – невозмущенную дефектом область базы. Сопротивление $R_н$ можно представить двумерной распределенной моделью, расчетная сетка которой показана на рис. 2, а. Поперечное сечение неоднородностей прямоугольной или треугольной формы выделены штриховкой. На расчетной сетке представлена половина дефекта, т.к. на левой границе сетки потенциалы узлов можно определить из условия симметрии. На рис. 2, б приведена эквивалентная схема узлов расчетной сетки: Y_n и Y_t (с индексами в круглых скобках) – нормальные и тангенциальные проводимости элементов объема, инцидентных узлу (i, j) .

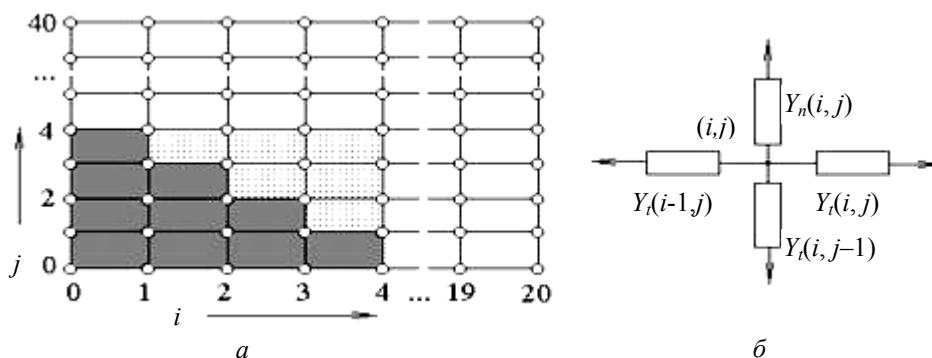


Рис. 2. Двумерная расчетная сетка распределенной модели сопротивления $R_н$ в электрическом аспекте (а) и эквивалентная схема узлов расчетной сетки (б)

Система узловых уравнений модели решалась на ЭВМ методом последовательной верхней релаксации [6]. Как показал анализ, в слое непосредственно над дефектом токи I_n, I_p достигают максимальных значений. В потенциостатическом режиме полный (по питанию) ток структуры с дефектом больше, чем без дефекта, и зависит от его размеров и формы. Превышение потребляемой мощности составляет 2,8 и 2,1% при геометрическом объеме неоднородности – 3,0 и 1,8% объема структуры.

Модель тепловой подсистемы. Фазовые переменные тепловой подсистемы: тепловые потоки Φ_n, Φ_t и температуры T – соответственно аналоги токов I_n, I_t и напряжений V . В тепловом аспекте область дефекта в базе СИД (электрофизической или теплофизической природы) можно представить двумерной распределенной моделью, расчетная сетка которой сдвинута относительно расчет-

ной сетки электрической подсистемы, как показано на рис. 3, а. На рис. 3, б приведена эквивалентная схема узлов тепловой расчетной сетки, где R_n и R_t (с индексами в круглых скобках) – нормальные и тангенциальные тепловые сопротивления элементов объема, инцидентных узлу (i, j) ; $C(i, j)$ – теплоемкость элемента объема; $\Phi(i, j)$ – источник тепла, управляемый электрической подсистемой.

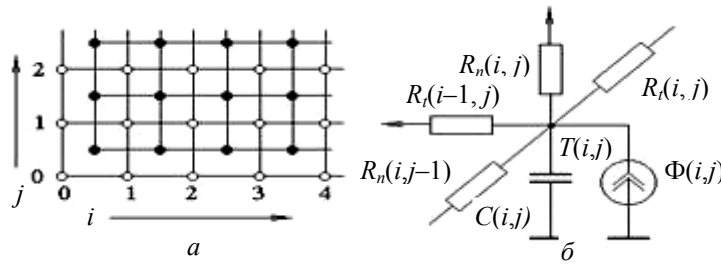


Рис. 3. Двумерные расчетные сетки распределенной модели области дефекта в электрическом (светлые узлы) и тепловом (темные узлы) аспектах (а) и эквивалентная схема узлов тепловой расчетной сетки (б)

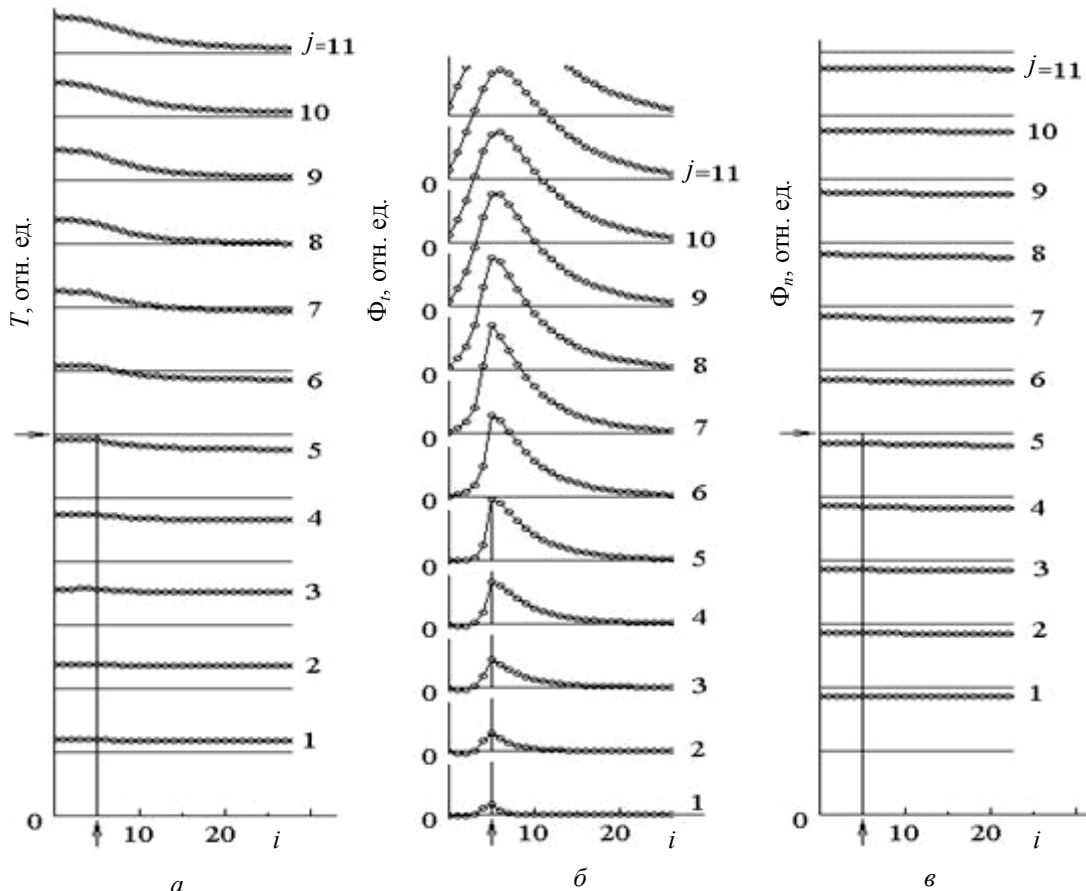
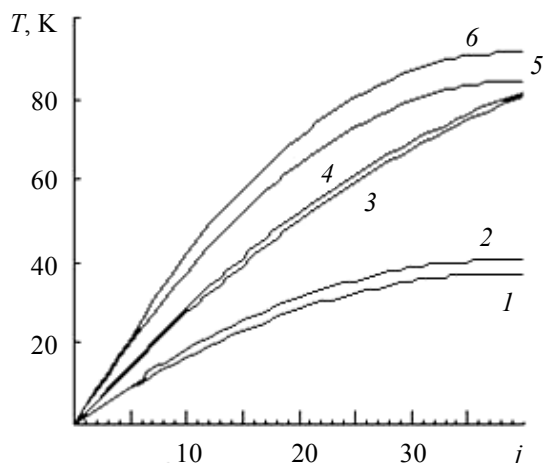


Рис. 4. Распределение температуры $T(i)$ (а), тангенциальной $\Phi_t(i)$ (б) и нормальной $\Phi_n(i)$ (в) составляющих теплового потока в структуре с дефектом электрофизической природы в установившемся режиме

Отсчет температуры T (рис. 4) велся относительно основания (радиатора) СИД, контактное тепловое сопротивление не учитывалось. Коэффициент теплопроводности базы СИД принят равным 1,3 Вт/(см К) [7].

Как показал численный анализ, в структуре с дефектом теплофизической природы наблюдаются еще большие изменения в распределении температуры $T(i)$, тангенциальной $\Phi_t(i)$ и нормальной $\Phi_n(i)$ составляющих теплового потока.

На рис. 5 представлена максимальная температура перегрева T_{\max} в j -м слое в зависимости от j для трех режимов работы структур без дефекта и с дефектом электрофизической природы. Область дефекта примыкает к омическому контакту базы. Разность максимальных температур в структурах с дефектом и без дефекта закономерно уменьшается по мере увеличения теплового потока $\Phi_{\text{гр}}$, втекающего через верхнюю границу (со стороны активной области СИД) в анализируемую область. С



увеличением мощности P , отбираемой структурой от источника питания, увеличиваются и температура перегрева структур, и разность максимальных температур T_{\max} в структурах с дефектом и без дефекта.

Рис. 5. Зависимость максимальной температуры в j -м слое от номера слоя в структурах без дефектов (1, 3, 5) и с дефектами электрофизической природы (2, 4, 6): V , В: 1–4 – 0,2; 5, 6 – 0,3; $\Phi_{\text{гр}}$, нВт: 1, 2 – 0,10; 3, 4 – $1,9 \cdot 10^6$; 5, 6 – 0,14; P , мВт: 1, 3 – 6,89; 2, 4 – 7,19; 5 – 15,50; 6 – 16,18

Заключение. Получены зависимости распределения нормальной и тангенциальной составляющих тока в структуре с дефектом электрофизической природы. Для тепловой модели получены распределения температуры (перегрев) по слоям структуры, нормальной и тангенциальной составляющей теплового потока для структуры с электрофизическим дефектом в установившемся режиме.

Рассчитаны зависимости максимальной температуры перегрева внутри активной зоны для трех режимов работы СИД для структур без дефекта и с дефектом электрофизической природы. Разность максимальных температур в структурах с дефектом и без дефекта уменьшается по мере увеличения теплового потока, вытекающего через верхнюю границу (со стороны активной области СИД) в анализируемую область. С увеличением мощности, отбираемой от источника питания, увеличивается и температура перегрева и разность максимальной температуры в структуре с дефектом и без дефекта, что закономерно.

Представленные результаты пока еще предварительные, но уже сейчас видно существенное влияние дефекта на электрическую и тепловую картину процессов в СИД. Таким образом, наличие даже мелких дефектов приводит к значительному перераспределению плотности тока и мощности в структуре и может вызывать локальные перегревы со всеми вытекающими отсюда последствиями.

На следующем этапе работы предполагается ввести учет взаимного влияния тепловой системы на электрическую и проведение более точного анализа электротепловых процессов в СИД. Такую обратную связь можно учесть, установив зависимости электрических проводимостей Y_n и Y_i от температуры T .

Результаты любых тепловых расчетов требуют обязательной проверки путем экспериментальных замеров температуры, что также предполагается сделать в дальнейшем. Такие измерения позволят убедиться, что принятое тепловое решение, с одной стороны, обеспечивает охлаждение перехода светодиодного чипа до требуемой температуры, а с другой – что решение не является избыточным, что важно с экономической точки зрения.

Необходима разработка трехмерных теплоэлектрических моделей, позволяющих оценить влияние степени дефектности, размера и местоположения дефектов (а также выяснение их конкретной природы) на распределение температуры и плотности тока в приборной структуре. Такие модели нужны не только разработчикам, но и технологам.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в соответствии с договором № 13.G25.31.0042 от 07.09.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Особенности конструирования мощных белых светодиодов / В.С. Абрамов, С.Г. Никифоров В.П. Сушков, А.В. Шишов // Светодиоды и лазеры. – 2003. – № 1–2. – С. 10–17.
2. Высокомощные синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN / Д.А. Закгейм, И.П. Смирнов и др. // ФТП. – 2005. – Т. 39, вып. 7. – С. 885–891.
3. Анализ причин падения эффективности электролюминесценции светодиодных гетероструктур AlGaInN при большой плотности тока накачки / И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм // ФТП. – 2006. – Т. 40, вып. 7. – С. 861–867.

4. Ходаков А.М. Математическое моделирование теплоэлектрических процессов в структурах полупроводниковых изделий с дефектами: автореф. дис. ... к.ф.-м.н. Ульяновск: УТУ, 2010.
5. Образование дефектов в эпитаксиальных слоях / Л.Л. Анисимова, А.К. Гутаковский, И.В. Ивонин и др. // Журнал структурной химии. – 2004. – Т. 45. – С. 96–101.
6. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высш. шк., 1989. – 320 с.
7. Нитрид галлия – перспективный материал электронной техники. Ч. 1: Фундаментальные свойства нитрида галлия / Р.Х. Акчурин, А.А. Мармалюк // Материаловедение. – 2001. – № 10. – С. 30–38.
8. Автоматизация схемотехнического проектирования: учеб. пособие для вузов / В.Н. Ильин, В.Т. Фромкин, А.И. Бутко и др.; под ред. В.Н. Ильина. – М.: Радио и связь, 1987. – 224 с.
9. Системы автоматизированного проектирования. Кн. 5. Автоматизация функционального проектирования: учеб. пособие для вузов: в 9 кн. / П.К. Кузьмин, В.Б. Маничев; под ред. И.П. Норенкова. – Минск: Высш. шк., 1988. – 159 с.

Романовский Михаил Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. конструирования узлов и деталей РЭА ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 51-23-27
Эл. почта: kudr@main.tusur.ru

Еханин Сергей Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. конструирования узлов и деталей РЭА ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 51-23-27
Эл. почта: gemma@main.tusur.ru

Romanovsky M.N., Yekhanin S.G.

Methods of calculating heat transfer in light-emitting diodes based on GaN

In the article we describe electrical and thermal dimensional distributed models of light-emitting diodes with a small near-surface defect in the triangular and rectangular shape. We present the discussion of the results.

Keywords: super-bright light-emitting diodes based on GaN, model calculations of heat transfer, temperature field.