

06

Влияние токовой локализации на внутреннюю квантовую эффективность светодиодов InAsSb/InAs

© Я.Я. Кудрик, А.В. Зиновчук

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева, Киев, Украина
Житомирский государственный университет им. И. Франко, Житомир,
Украина
E-mail: zinovchuk.a@zu.edu.ua

Поступило в Редакцию 11 января 2012 г.

Исследовано влияние токовой локализации на внутреннюю квантовую эффективность (ВКЭ) светодиодов InAsSb/InAs среднего инфракрасного (ИК) диапазона ($\lambda = 3-5 \mu\text{m}$). Расчет на основе модифицированной модели рекомбинационных коэффициентов показывает, что токовая локализация приводит к значительному уменьшению ВКЭ светодиодов. Эффект уменьшения становится особенно заметным в более длинноволновых светодиодах (23% для $\lambda = 3.4 \mu\text{m}$ и 39% для $\lambda = 4.2 \mu\text{m}$). Представленные результаты свидетельствуют о том, что токовую локализацию необходимо принимать во внимание как один из дополнительных нетермических механизмов падения эффективности в ИК-светодиодах.

Одной из общих проблем для светодиодов разных спектральных диапазонов является эффект токовой локализации. Этот эффект состоит в локализации линий протекания тока в некоторых областях многослойной структуры светодиодов вследствие достаточно высоких удельных сопротивлений слоев и конструктивных особенностей внешнего дизайна светодиода, связанных с необходимостью вывода излучения. Эффект локализации хорошо известен в светодиодах как видимого (InGaN [1], AlGaInP [2]), так и ИК (InAsSb [3]) диапазонов. Представлено несколько публикаций по численному [4,5] и аналитическому [1,6,7] моделированию растекания тока в светодиодах. Эти работы направлены на улучшение растекания тока по активной области приборов путем оптимизации внутренних параметров (сопротивления и толщины подложки, ограничивающих слоев, слоев растекания) и геометрии контактов. Также в них отмечается, что токовая локализация

приводит к активации безызлучательной рекомбинации, локальному разогреву структуры и, как следствие, к уменьшению квантовой эффективности светодиодов. Однако количественных расчетов влияния локализации на ВКЭ светодиодов ранее не проводилось. Вследствие доминирующей роли безызлучательной оже-рекомбинации в узкозонных полупроводниках, эффекты локализации должны быть особенно актуальными в светодиодах среднего ИК-диапазона. Поэтому объектами нашего исследования были светодиоды среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур InAsSb/InAs, технология изготовления и основные параметры которых хорошо известны из литературы [8,9]. В данной работе были рассчитаны зависимости ВКЭ светодиодов InAsSb от уровня инжекции с учетом эффекта токовой локализации.

Нами рассматривались светодиоды InAsSb/InAs стандартной планарной конфигурации с круглым контактом радиуса $r_0 = 50 \mu\text{m}$ на верхней поверхности (рис. 1, *a*). В расчетах пространственных распределений плотности тока предполагалось наличие осевой симметрии структуры (светодиоды имеют цилиндрическую форму с радиусом $R = 300 \mu\text{m}$). Принимая во внимание данные о внутренней структуре светодиодов InAsSb/InAs, представленные в работе [8], в нашей модели учитывались три наиболее важных слоя, каждый из которых характеризовался толщиной и удельным сопротивлением: подложка p -InAs (d_n, ρ_n), активный слой n -InAsSb (d_{al}, ρ_{al}) и верхний слой растекания n -InAsSbP (d_n, ρ_n). Мы использовали следующие числовые значения параметров: $d_n = 5 \mu\text{m}$, $\rho_n = 6.2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, $d_p = 200 \mu\text{m}$, $\rho_p = 4.1 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, $d_{al} = 2 \mu\text{m}$. Считалось, что активный слой характеризуется нелинейным сопротивлением p - n -перехода, которое рассчитывалось исходя из диодной вольт-амперной характеристики: $\rho_{al} = \varphi_{al} / (d_{al} j_0 (\exp(e\varphi_{al} / \beta k T) - 1))$, где φ_{al} — падение потенциала на активном слое, k — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона, β — фактор идеальности p - n -перехода, j_0 — плотность тока насыщения. Во всех расчетах принимали $\beta = 1$, $T = 300 \text{ K}$, а также ток насыщения рассчитывался из формулы Шокли в теории идеального p - n -перехода [10]. Известно, что, изменяя концентрацию Sb в активном слое InAsSb, можно изменять длину волны светодиодов в пределах среднего ИК-диапазона. В данной работе рассматривались светодиоды, излучающие на трех практически важных длинах волн $\lambda = 3.4, 3.8$ и $4.2 \mu\text{m}$. Единственным различием между моделями светодиодов для разных длин волн было значение плотности тока насыщения j_0 , которое

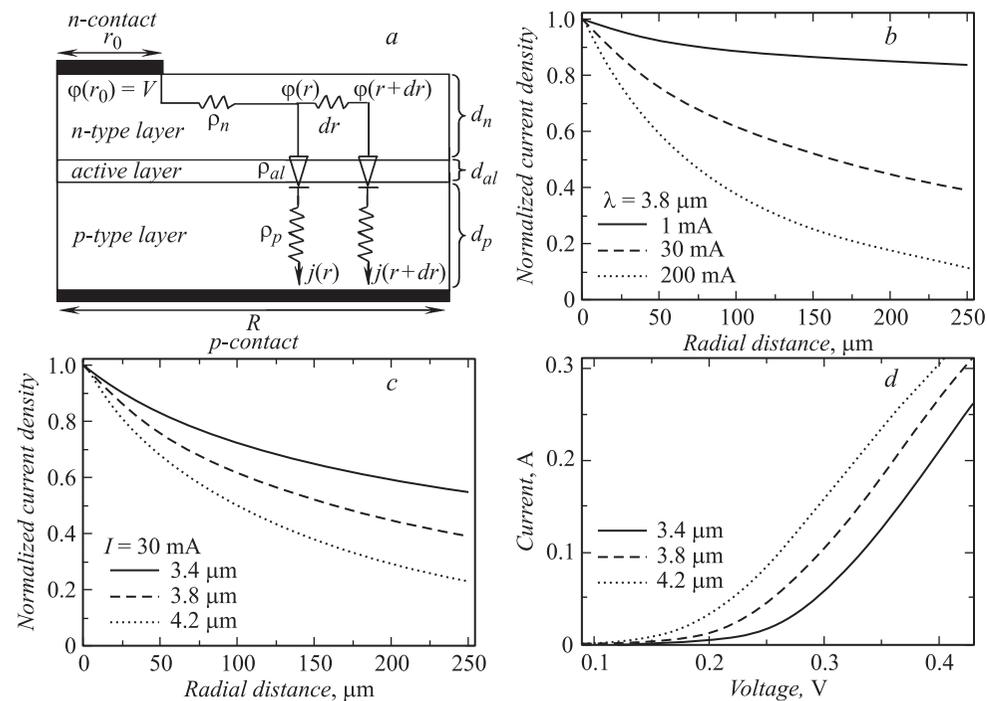


Рис. 1. Схема поперечного сечения планарного светодиода (а). Нормированные распределения плотности тока в светодиоде на $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ в зависимости от уровня инжекции (b) и длины волны светодиода при $I = 30 \text{ mA}$ (c). Начало отсчета соответствует краю n-контакта. ВАХ светодиодов на разные длины волн с учетом эффекта локализации (d).

зависит от ширины запрещенной зоны активного слоя InAsSb (E_g): $j_0 \sim \exp(-E_g/kT)$.

Применяя законы Кирхгофа к эквивалентной цепи светодиода, показанной на рис. 1, *a*, можно показать, что зависимость электрического потенциала (φ) в верхнем n -слое от радиальной координаты (r) описывается уравнением

$$\frac{d^2\varphi(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi(r)}{dr} = \frac{\rho_n}{d_n} j(r), \quad (1)$$

где $j(r)$ — вертикальная компонента плотности тока. Принимая нулевой потенциал на p -контакте ($\varphi_p = 0$), падение потенциала от верхнего n -слоя к p -контакту может быть записано как

$$\varphi(r) = (\rho_p d_p + \rho_{al} d_{al}) j(r). \quad (2)$$

Для того чтобы получить аналитическое решение системы уравнений (1)–(2), мы предположили, что падение потенциала на активном слое не зависит от радиальной координаты r и равно разности между приложенным к светодиоду напряжением V и падением потенциала на p -слое: $\varphi_{al} = V - I(\rho_p d_p)/S$, где I — полный ток, а S — площадь светодиода. В таких предположениях решение системы уравнений (1)–(2) для плотности тока, соответствующее физическим условиям, можно представить в виде

$$j(r) = \frac{VK_0(\alpha r)}{K_0(\alpha r_0)(\rho_p d_p + \rho_{al} d_{al})}, \quad (3)$$

где $\alpha = \sqrt{\rho_n / (d_n(\rho_p d_p + \rho_{al} d_{al}))}$, а $K_0(\alpha r)$ — модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка. Формула (3) представляет собой зависимость плотности тока растекания от расстояния от края верхнего n -контакта. Проинтегрировав (3) по всей площади светодиода (считая, что под n -контактом плотность равна $j(r_0)$), получаем вольт-амперную характеристику светодиода с учетом эффекта локализации (рис. 1, *d*). На рис. 1 показаны радиальные распределения плотности тока в зависимости от уровня инжекции (рис. 1, *b*) и длины волны светодиода (рис. 1, *c*). При малых уровнях инжекции эффект локализации пренебрежимо мал вследствие достаточно большого сопротивления активного слоя (ρ_{al}) по сравнению с сопротивлением остальных слоев.

Увеличение уровня инжекции приводит к быстрому уменьшению ρ_{al} и локализации линий тока под верхним n -контактом. Усиление локализации с увеличением длины волны светодиода объясняется зависимостью ρ_{al} от ширины запрещенной зоны активного слоя InAsSb. При одинаковом уровне инжекции величина ρ_{al} в длинноволновых светодиодах меньше и токовая локализация происходит сильнее.

Согласно модели рекомбинационных коэффициентов, в стационарных условиях плотность тока в активном слое связана с концентрацией инжектированных носителей n соотношением $j/(ed_{al}) = An + Bn^2 + Cn^3$, где A , B и C — коэффициенты безызлучательной (Шокли–Рида), излучательной и оже-рекомбинации соответственно. Из этого соотношения, используя (3), получаем радиальную зависимость концентрации инжектированных носителей $n(r)$. Наконец, по известной зависимости $n(r)$ ВКЭ светодиодов может быть рассчитана как

$$\eta = \frac{P/h\nu}{I/e} = \frac{d_{al} 2\pi \int_0^R Bn^2(r) r dr}{I/e}, \quad (4)$$

где $P/h\nu$ — число фотонов, излученных из активного слоя за секунду (P — оптическая мощность, $h\nu$ — энергия фотона), I/e — число электронов, инжектированных в активный слой за секунду. На рис. 2 сравниваются результаты расчета ВКЭ и оптической мощности светодиодов InAsSb для разных длин волн в зависимости от тока. При этом для коэффициента A принималось одно и то же значение $1.0 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ для всех светодиодов. Коэффициенты B и C , в зависимости от ширины запрещенной зоны активного слоя E_g в eV, находились по формулам, представленным в работах [11,12]: $B = 3.0 \cdot 10^{-10} (E_g/1.5)^2 (\text{cm}^3/\text{s})$ и $C = 1.2 \cdot 10^{-27} E_g^{-5/2} \exp(-4.25 E_g) (\text{cm}^6/\text{s})$. Штрихованные кривые на рис. 2 представляют ВКЭ, рассчитанную без учета токовой локализации (j и n считались пространственно-независимыми). При низких уровнях инжекции $I < 3 \text{ mA}$ расчет с учетом и без учета эффекта локализации дает одни и те же значения ВКЭ (сплошные и штрихованные кривые совпадают). Однако при высоких уровнях инжекции эффект локализации приводит к значительному уменьшению ВКЭ. Как видно из рис. 1, b , плотность тока под верхним n -контактом может быть существенно больше, чем среднее значение плотности тока. Например, при $I = 200 \text{ mA}$ максимальная плотность тока $j_{\text{max}} = 220 \text{ A/cm}^2$, тогда

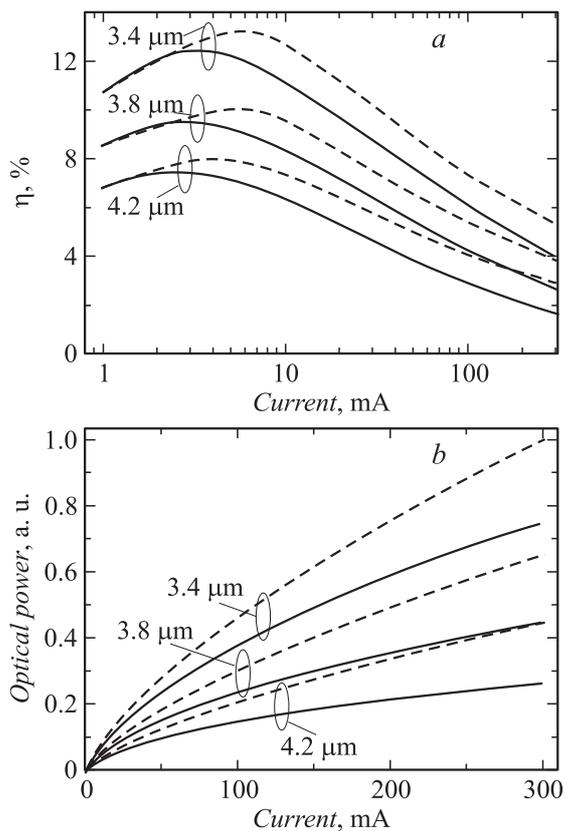


Рис. 2. ВКЭ (*a*) и оптическая мощность (*b*) светодиодов на разные длины волн. Сплошные кривые — расчет с учетом эффекта локализации, штрихованные кривые — без учета локализации.

как среднее значение $j_{av} = 72 \text{ A/cm}^2$. Это приводит к активизации оже-рекомбинации в области под верхним *n*-контактом, что сопровождается понижением ВКЭ. Причем, вследствие более сильной локализации тока, в длинноволновых светодиодах уменьшение ВКЭ особенно заметно. Так, при $I = 200 \text{ mA}$ в светодиоде на $3.4 \mu\text{m}$ уменьшение ВКЭ, спровоцированное токовой локализацией, составляет 23%, тогда как в светодиоде на $4.2 \mu\text{m}$ — 39%.

В завершение мы представили количественные оценки влияния токовой локализации на падение ВКЭ светодиодах InAsSb среднего ИК-диапазона. Результаты работы показывают, что при высоких уровнях инжекции токовая локализация уменьшает ВКЭ более чем на 20%. Все расчеты проводились без учета саморазогрева, что позволяет рассматривать эффект токовой локализации как дополнительный механизм уменьшения ВКЭ ИК-светодиодов. В отличие от температурного фактора, который может быть частично устранен при импульсном режиме питания, эффект локализации должен приниматься во внимание при разработке новых ИК-светодиодов, работающих как при импульсных, так и при стационарных нагрузках.

Список литературы

- [1] Guo X., Schubert E.F. // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 85. N 8. P. 4191–4195.
- [2] Fletcher R.M., Kuo C.P., Osentowski T.D., Huang K.H., Craford M.G., Robbins V.M. // *J. Electron. Mater.* 1991. V. 20. N 12. P. 1125–1130.
- [3] Malyutenko V.K., Malyutenko O.Yu., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Matveev B.A., Remennyi M.A., Stus N.M. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. N 25. P. 4228–4230.
- [4] Malyutenko V.K., Zinovchuk A.V., Malyutenko O.Yu. // *Semicond. Sci. Technol.* 2008. V. 23. N 9. P. 085004.
- [5] Evstratov I.Yu., Mymrin V.F., Karpov S.Yu., Makarov Yu.N. // *Phys. Status Solidi C.* 2006. V. 3. N 6. P. 1645–1648.
- [6] Joyce W.B., Wemple S.H. // *J. Appl. Phys.* 1970. V. 41. N 9. P. 3818–3830.
- [7] Perks R.M., Porch A., Morgan D.V., Kettle J. // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 100. N 8. P. 083109.
- [8] Зотова Н.В., Кижжаев С.С., Молчанов С.С., Молчанова Т.И., Лагунова Т.С., Пушиный Б.В., Яковлев Ю.П. // *ФТП.* 2003. Т. 37. В. 8. С. 980–984.
- [9] Matveev B., Zotova N., Karandashov S., Remennyi M., Il'inskaya N., Stus N., Shustov V., Talalakin G., Malinen J. // *IEEE Proc. Optoelectron.* 1998. V. 145. N 5. P. 254–256.
- [10] Shockley W. // *Bell Sys. Tech. J.* 1949. V. 28. N 3. P. 435–489.
- [11] Garbuzov D.Z. // *J. Luminescence.* 1982. V. 27. N 1. P. 109–112.
- [12] Гельмонт Б.Л., Соколова З.Н. // *ФТП.* 1982. Т. 16. В. 9. С. 1670–1673.