

Влияние температуры на электролюминесцентные свойства flip-chip светодиодов среднего ИК-диапазона ($\lambda_{\max} \approx 3.4$ мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP

© А.А. Петухов[¶], Н.Д. Ильинская, С.С. Кижаяев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 апреля 2011 г. Принята к печати 11 мая 2011 г.)

Приведены результаты исследования зависимости электрических и электролюминесцентных свойств флип-чип светодиода на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP ($\lambda \approx 3.37$ мкм) от температуры (20–200°C). Показано, что протекание тока через светодиод определяется туннельно-рекомбинационным (прямое смещение) и диффузионным (обратное смещение) механизмами. Максимум спектра излучения определяется рекомбинацией зона–зона. При нагреве светодиода вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны арсенида индия спектр излучения смещается в область больших длин волн. Уменьшение мощности излучения с увеличением температуры носит сверхэкспоненциальный характер и обусловлено главным образом ростом скорости оже-рекомбинации.

1. Введение

Светодиоды среднего инфракрасного диапазона являются перспективными источниками излучения при создании сенсоров для целей газоанализа. В диапазоне длин волн 3.3–3.4 мкм находятся основные характеристические полосы поглощения СН-групп, в частности, таких веществ как метан, спирты и проч. [1]. Одним из практических приложений подобных сенсоров является установление источников загрязнения воздуха взрывоопасными компонентами на предприятиях нефтехимической и горнодобывающей промышленности при различной температуре окружающей среды.

Целью данной работы является изучение электролюминесцентных характеристик светодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP при высоких рабочих температурах в интервале значений 20–200°C.

2. Изучаемые объекты и методики исследования

Светодиодные структуры выращивались методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках Suncaster 193-n-InAs (100), легированных серой до концентрации электронов $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Эпитаксиальная часть состояла из преднамеренно нелегированного слоя InAs ($n \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2 мкм и легированного цинком эмиттерного слоя InAs_{0.48}Sb_{0.17}P_{0.35} ($p \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2 мкм. В [1] исследовались близкие по структуре светодиоды. Было установлено, что вследствие диффузии цинка из барьерного слоя p-InAs_{0.27}Sb_{0.23}P_{0.50} в активную область InAs, p-n-переход располагается в активной области на расстоянии 0.5 мкм от подложки. Светодиоды были изготовлены в виде флип-чипов (640 × 670 мкм) с последующим монтажом на стандартных корпусах ТО-5.

[¶] E-mail: andrey-rus29@rambler.ru

Спектральные измерения проводились в квазинепрерывном режиме при амплитуде токовых импульсов 100 мА и частоте 512 Гц. В качестве диспергирующего прибора использовался монохроматор MS 35041, фотосигнал регистрировался с применением синхронного детектирования охлаждаемым до 77 К фотоприемником на основе InSb (Electro-Optical Systems Inc. IS-10-E-LN4). Сопротивление при нулевом смещении R_0 измерялось с помощью мостовой схемы при напряжении на светодиоде величиной –10 мВ.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Электрические свойства

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) структуры при температурах 20 и 200°C.

Как известно, в области малых смещений ($U < E_g/q$, где q — заряд электрона) прямой ток описывается выражением

$$I \propto \exp(qU/\eta kT), \quad (1)$$

где η — параметр, характеризующий механизм протекания тока. Если $\eta = 1$, то преобладает диффузионный ток; в случае $\eta = 2$ доминирует рекомбинационный ток [1,2]. В данном случае, значение η увеличивается с ростом напряжения от 1.1 до 1.6, что говорит о смешанном диффузионно–рекомбинационном механизме протекания тока при малых смещениях ($U < E_g/q$).

Рассмотрим ВАХ в области напряжений $U > E_g/q$. На рис. 2 приведены зависимости $\ln I \propto f(U)$ при разных температурах. Из рисунка видно, что при смещениях, больших некоторого значения, зависящего от температуры (например, при $T = 20^\circ\text{C}$, $U \approx 320$ мВ), $\ln I$ линейно увеличивается с ростом напряжения, причем $d \ln I/dU$ близки для разных температур. Согласно [3], подобный

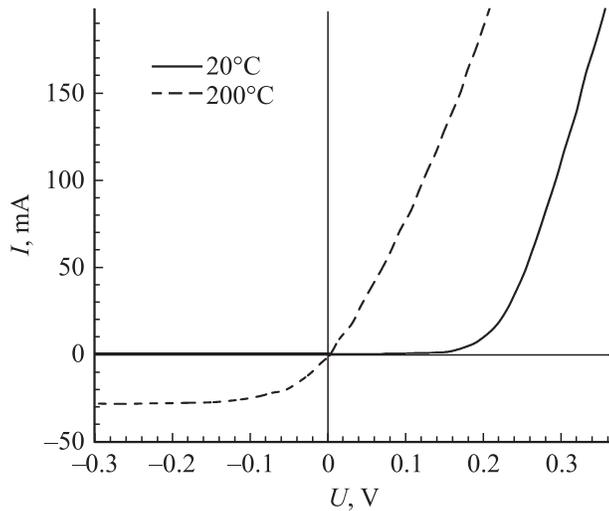


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики светодиода при температурах 20 и 200°C.

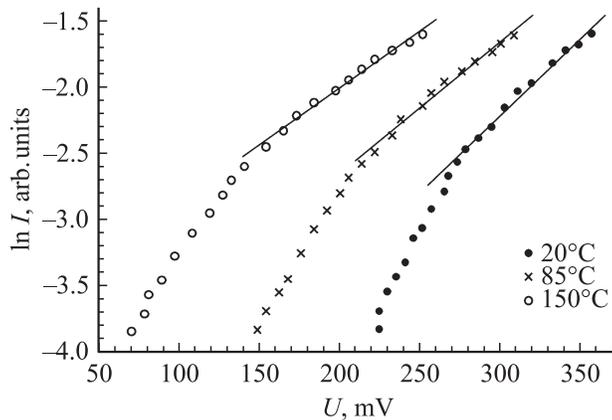


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики светодиода в зависимости от температуры.

ВАХ характерен для туннельного механизма протекания тока и может быть описан в рамках туннельно-рекомбинационной модели Райбена и Фойхта соотношением вида

$$I \propto \exp(AU) \exp(BT), \quad (2)$$

где A и B — константы.

Для проверки предположения о туннельной природе тока посредством линейной аппроксимации $\ln I \propto U$ при $100 \text{ mA} < I < 200 \text{ mA}$ была рассчитана величина $A_{ef} = d \ln I / dU$. На рис. 3 показана зависимость величины A_{ef} от температуры. Из рисунка видно, что A_{ef} , вопреки предположению о ее постоянстве, зависит от температуры. Однако наблюдается корреляция величины A_{ef} и последовательного сопротивления R_{series} , рассчитанного из ВАХ (см. рис. 3). Очевидно, что только часть приложенного напряжения падает на р-п-переходе, причем доля этого напряжения тем меньше, чем больше R_{series} . Следовательно, величина A_{ef} , определяемая из

ВАХ диода, оказывается меньше параметра A из формулы (2), характеризующего непосредственно р-п-переход. Экстраполяция зависимости $A_{ef} = f(R_{series})$ полиномом второй степени в область $R_{series} \approx 0$ позволяет оценить величину A , которая составляет 24 В^{-1} .

Предположение о туннельной природе тока подтверждает постоянство величины $B = d \ln I / dT = 7.4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ во всем рассматриваемом интервале температур.

Последовательное сопротивление светодиода увеличивается с ростом температуры по закону $R_{series}(\text{Om}) \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot T(\text{K}) + 0.17$ (при $T = 300 \text{ K}$, $R_{series} = 0.68 \text{ Om}$) и определяется сопротивлением контактов, так как суммарное сопротивление полупроводниковых слоев при комнатной температуре не превышает 2 mOm . Напряжение отсечки, характеризующее высоту потенциального барьера р-п-перехода, линейно уменьшается с ростом температуры: $U_{cut}(\text{mB}) \approx 583 - 1.16 \cdot T(\text{K})$.

Рассмотрим обратные ветви ВАХ (рис. 1) и зависимость сопротивления R_0 от температуры. Как известно [2], при обратном смещении величина тока может быть описана зависимостью $I \propto \exp(-E_g / \eta kT)$, где η имеет тот же физический смысл, что и в (1). Следовательно, при постоянном напряжении сопротивление светодиода определяется выражением $R_0 \propto \exp(E_g / \eta kT)$. Как и следовало ожидать, зависимость $\ln R_0 = f(E_g / kT)$ линейна, т.е. сопротивление диода экспоненциально уменьшается с ростом температуры ($R_0(\text{Om}) \approx 1.36 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(6741 / T(\text{K}))$). При этом $\eta = d(E_g / kT) / d \ln R_0 = 1.28$, что говорит о смешанном механизме протекания тока при комнатной доминирующей роли диффузионной составляющей. Действительно, ток, начиная с малых значений напряжения, имеет ярко выраженное насыщение, что характерно для диффузионного механизма протекания тока (рис. 1).

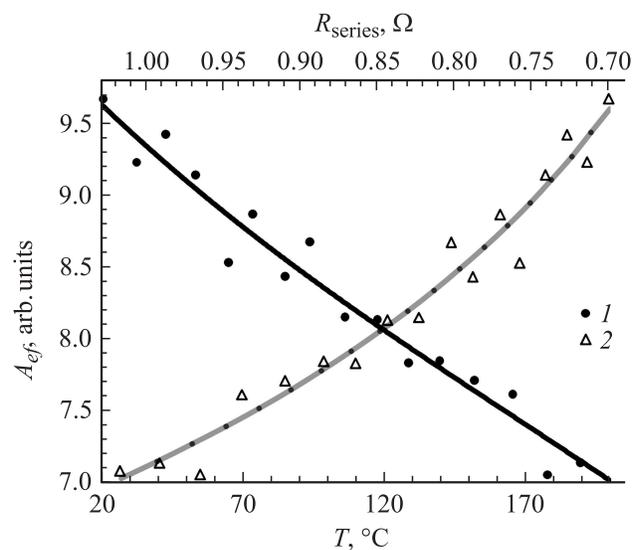


Рис. 3. 1 — Величина A_{ef} в зависимости от температуры, 2 — зависимость A_{ef} от последовательного сопротивления светодиода R_{series} .

3.2. Электролюминесцентные свойства

Спектр излучения светодиода при комнатной температуре представлен на рис. 4. Длина волны в максимуме спектральной плотности мощности при температуре 22°C составляет 0.368 эВ (3.37 мкм), а полуширина спектра излучения — 42 мэВ.

При оптических переходах с сохранением волнового вектора энергия перехода из зоны проводимости в валентную зону должна быть меньше энергии максимума электролюминесценции $h\nu_{\max}$ на величину $kT/2$ [4], т. е. $E_g^{\text{calc}} = h\nu_{\max} - \frac{1}{2}kT = 0.355$ эВ. Из [5] известно, что ширина запрещенной зоны арсенида индия при комнатной температуре составляет 0.354 эВ, что практически совпадает с E_g^{calc} .

С увеличением температуры максимум излучения смещается в длинноволновую область спектра (рис. 5), что связано с уменьшением ширины запрещенной зоны

$$E_g^{\text{calc}} (\text{эВ}) = h\nu_{\max} - \frac{1}{2}kT = 0.4516 - 3.2892 \cdot 10^{-4} \cdot T$$

при $295 \text{ K} < T < 450 \text{ K}$.

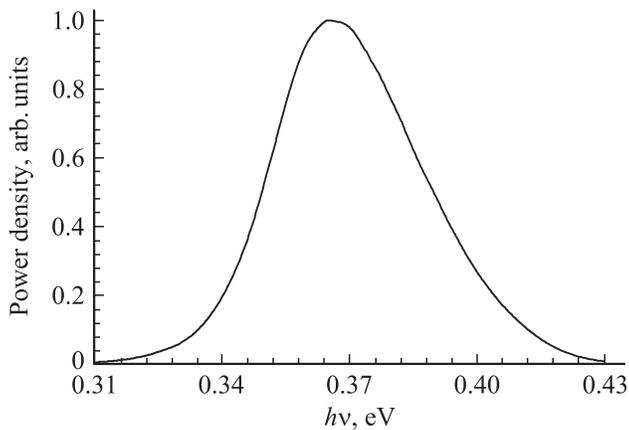


Рис. 4. Спектр излучения светодиода при 22°C.

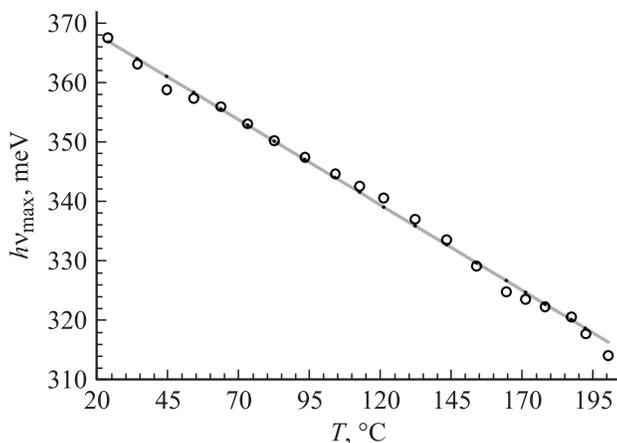


Рис. 5. Величина максимума спектра излучения в зависимости от температуры.

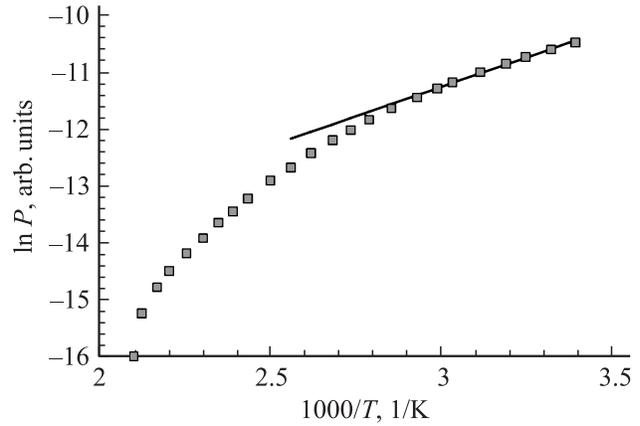


Рис. 6. Зависимость логарифма мощности излучения от обратной температуры.

Известно, что одним из основных каналов рекомбинации носителей в материалах инфракрасной оптоэлектроники является безызлучательная оже-рекомбинация [6–9]. В p-InAs наиболее вероятным является оже-процесс, при котором рекомбинация носителей сопровождается переходом тяжелой дырки в спин-орбитально отщепленную подзону (СННС-процесс) [6,10]. Скорость СННС-процесса $R_p = \gamma_p n p^2$, где n и p — концентрация носителей, а γ_p — коэффициент рекомбинации. В первом приближении $\gamma_p \propto \exp(-\varepsilon^{\text{th}}/kT)$, где ε^{th} — пороговая энергия процесса. Следовательно, с ростом температуры скорость безызлучательной рекомбинации должна экспоненциально увеличиваться, а мощность излучения экспоненциально уменьшаться.

Из рис. 6 видно, что $\ln P \propto 1/T$ только при $T < 70^\circ\text{C}$. При больших температурах зависимость сверхэкспоненциальна. Во-первых, это может быть связано с тем, что коэффициент γ_p в InAs чувствителен к значению разности $E_g - \Delta$, где Δ — энергия спин-орбитального расщепления. Во-вторых, с ростом собственной концентрации носителей скорость безызлучательной рекомбинации может увеличиваться за счет СНСС-процесса (рекомбинация электрона и дырки с передачей выделившейся энергии другому электрону зоны проводимости).

4. Заключение

Исследованы электрические и электролюминесцентные свойства флип-чип светодиода на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP. Показано, что протекание тока в области малых напряжений при прямом смещении, а также при обратном смещении обусловлено диффузионным и генерационно-рекомбинационным механизмами. Установлено, что при смещениях, большего значения, зависящего от температуры, ток имеет туннельную природу. Напряжение отсечки линейно

уменьшается при увеличении температуры: $U_{\text{cut}}(\text{мВ}) \approx \approx 583 - 1.16 \cdot T(\text{К})$, а последовательное сопротивление увеличивается: $R_{\text{series}}(\text{Ом}) \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot T(\text{К}) + 0.17$.

Получено выражение для изменения ширины запрещенной зоны InAs с температурой: $E_g(\text{эВ}) = 0.4516 - 3.2892 \cdot 10^{-4} \cdot T(\text{К})$. Показано, что уменьшение мощности излучения с ростом температуры обусловлено увеличением скорости оже-рекомбинации.

Авторы выражают благодарность О.В. Макарову, Э.В. Иванову, Е.В. Кузнецовой, А.С. Головину и К.В. Калининной за техническую помощь.

Список литературы

- [1] А.П. Астахова, А.С. Головин, Н.Д. Ильинская, К.В. Калинин, С.С. Кизжаев, О.Ю. Серебренникова, Н.Д. Стоянов, Zs.J. Horvath, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **44** (2), 278 (2010).
- [2] В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. *Полупроводниковые приборы* (М., Высш. шк., 1987).
- [3] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979).
- [4] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **35** (12), 1431 (2001).
- [5] М.Р. Mikhailova. *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur (London, World Scientific, 1999).
- [6] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясевич. *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках* (СПб, ПИЯФ, 1997).
- [7] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **37** (8), 996 (2003).
- [8] Б.Л. Гельмонт, З.Н. Соколова, И.Н. Ясевич. *ФТП*, **16** (4), 592 (1982).
- [9] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **35** (5), 619 (2001).
- [10] Т.Н. Данилова, Б.Е. Журтанов, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **39** (11), 128 (2005).

Редактор Л.В. Беляков

Temperature dependence of the electroluminescent properties of mid-infrared ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$) flip-chip LED based on InAs/InAsSbP heterostructure

A.A. Petuhov, N.D. Il'inskaya, S.S. Kizhaev, N.D. Stoyanov, Yu.P. Yakovlev

loffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Electrical and electroluminescent properties of flip-chip LED based on InAs/InAsSbP heterostructure ($\lambda \approx 3.37 \mu\text{m}$) versus temperature between 20 and 200°C are discussed. It is shown that the current through the LED is determined by the tunneling-recombination (forward bias) and diffusion (reverse bias) mechanisms. The reducing of the radiation power with increasing temperature has an superexponential nature and is mainly due to increase in the rate of Auger recombination. The LED's peak emission of the spectrum shifts towards the longer wavelengths direction with increasing temperature.