

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА С УЧЕТОМ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

С.В. Грищенко

Харьковский Национальный университет Радиоэлектроники, 61166 Харьков, Украина

E-mail: s_gryshchenko@kture.kharkov.ua

Поступила в редакцию 12 ноября 2009 г.

В работе представляется теоретический анализ квантовой эффективности резонансного InGaAs/GaAs P-i-n фотодетектора (РФД). Математическая модель включает в себя метод матриц переноса, уравнение теплопроводности и зависимость показателя преломления от температуры. Рассчитаны распределение температуры в структуре РФД и квантовая эффективность с учетом градиента температуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Резонансный фотодетектор, показатель преломления, температурный сдвиг.

У роботі представляється теоретичний аналіз квантової ефективності резонансного InGaAs/GaAs P-i-n фотодетектора (РФД). Математична модель включає метод матриць перенесення, рівняння теплопровідності і залежність показника заломлення від температури. Розраховані розподіл температури в структурі РФД і квантова ефективність з врахуванням градієнта температури.

КЛЮЧОВІ СЛОВА. Резонансний фотодетектор, показник заломлення, температурне зміщення.

In paper a theoretical analysis of quantum efficiency of resonance InGaAs/GaAs P-i-n photodetector (RCE PD) is presented. A mathematical model plugs in itself the transfer matrix method, heat conductivity calculation and dependence of index of refraction from a temperature. Distributing of temperature in the structure of RCE PD and quantum efficiency taking into account the gradient of temperature was calculated.

KEY WORDS. Resonant cavity photodetector, refractive index, temperature shift.

ВВЕДЕНИЕ

Температурный сдвиг резонансной частоты обусловлен изменением показателя преломления полупроводниковых слоев детектора. Смещение рабочей частоты приводит к рассогласованию спектральных характеристик передатчика и приемника, и может в итоге привести к сильному ухудшению характеристик оптического соединения [1]. Проблема становится особенно важной в оптических межкомпонентных соединениях на интегральных платах, где в качестве устройств приема-передачи выгодно использовать лазеры с вертикальным резонатором и РФД [2,3]. Данные устройства обладают низким электропотреблением, высокой направленностью излучения и малыми размерами. С другой стороны, многослойная структура таких устройств и высокая плотность упаковки приводят к значительному влиянию температурных эффектов[3].

В детектирующих структурах не происходит процессов, приводящих к повышению температуры, однако на микросхемах приемники излучения располагаются на поверхностях управляющих чипов[4]. Рабочая температура чипов в современных интегральных микросхемах колеблется от 70⁰ до 90⁰ Цельсия. Это приводит к неизбежному нагреву структуры и появлению в ней градиента температуры.

Целью данной работы является получить и проанализировать спектральные характеристики квантовой эффективности(КЭ) резонансного фотодетектора, учитывая влияние температурного градиента в структуре.

ИССЛЕДУЕМАЯ СТРУКТУРА

Схематическое изображение исследуемой структуры представлено на рис. 2.1. Выбор InGaAs в качестве активного вещества был обусловлен наличием пика поглощения в области 1 мкм, так как значительная часть излучателей, применяемых в системах передачи данных, работают в этой спектральной области. В качестве материала разделительного слоя фотодетектора был выбран GaAs. Такой выбор, в первую очередь, связан с малым поглощением на рабочей длине волны [4, 5]. Для распределенного Береговского отражателя (РБО) был выбран многослойный стек $Al_{0.87}Ga_{0.13}As$. Эта структура обладает низкими барьерными напряжениями, высокой теплопроводностью, высокой электропроводностью, необходимым контрастом показателей преломления, малыми потерями поглощения излучения на свободных носителях и возможностью использования существующих методов поперечного ограничения тока и оптического поля [6].

Значения теплопроводности для каждого слоя были получены с помощью интерполяционных формул. Для тройных соединений использовалась интерполяция второго порядка. Например, для $Al_xGa_{(1-x)}As$, теплопроводность которого весьма чувствительна к содержанию алюминия:

$$\frac{1}{k(x)} = xW_{AC} + (1-x)W_{BC} + x(1-x)C_{AC}, \quad (8)$$

где W_{AC}, W_{BC} теплопроводности для бинарных соединений а C_{AC} параметр искривления.

На рис. 2 показано распределение температуры в исследуемом резонансном детекторе.



Рис. 2. Распределение температуры в резонансом фотодетекторе

При моделировании мы считали, что температура воздуха со стороны входного зеркала $T_1=20^{\circ}\text{C}$, а температура подложки $T_2=70^{\circ}\text{C}$. Такая температура подложки характерна для рабочих режимов процессоров в современной компьютерной технике, например в видеокартах. Область нелинейного распределения температуры (на графике от 3-х до 4-х мкм) соответствует внутррезонаторной области. Линейные участки соответствуют распределению температуры в Бреговских зеркалах.

Линейное распределение температуры в зеркалах может быть объяснено тем, что при моделировании были выбраны граничные условия Дирихле, которые задают постоянные значения температуры.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Температурная зависимость показателя преломления может быть рассчитана из изменения запрещенных зон полупроводника [7]. В этом случае $n(T)$ зависит от смещения края собственного поглощения материала.

$$n^2 - 1 = \frac{A}{\pi} \ln \frac{(E_g^{\Lambda})^2}{(E_g^{\Gamma})^2} \frac{Q_{\Lambda}}{Q_{\Gamma}} + \sum_{j=\Lambda, X} G_j (E_g^j)^2 Q_j^{-1} + G_{TO} E_{TO}^{-2} Q_{TO}, \quad (9)$$

где $Q_j = 1 - (\hbar\omega/E_j)^2$, A и G_j — дисперсионные параметры, E_j и E_{TO} запрещенные зоны в соответствующей долине и фоновая запрещенная зона соответственно.

Первое слагаемое в формуле (9) описывает соотношение между энергией запрещенных зон в G и Λ точках симметрии зоны Бриллюэна, второе слагаемое есть сумма вкладов запрещенных зон в Λ и x точек симметрии зоны Бриллюэна. Третье слагаемое соответствует вкладу фононов в изменение показателя преломления.

Можно утверждать, что данное уравнение позволяет рассчитать показатель преломления и для непрямозонных материалов. В исследуемой структуре используется оксидное окно на основе $Al_{0.98}GaAs$, который является непрямозонным материалом.

Для расчета спектральных характеристик был использован метод матриц переноса. КЭ может быть рассчитана из спектров отражения и пропускания. Поглощение задается с помощью комплексной части показателя преломления, $n_j = n - ik$ где k — коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции показывает часть рассеянного и поглощенного электромагнитного излучения на единицу длины в среде и

определяется как $k = \frac{\lambda\alpha}{4\pi}$, где α коэффициент поглощения материала.

На рис. 3 сплошная кривая соответствует расчету квантовой эффективности без учета температурных эффектов. Для разработанной модели это аналогично тому, как если бы температура каждого слоя структуры была равна 300°K .

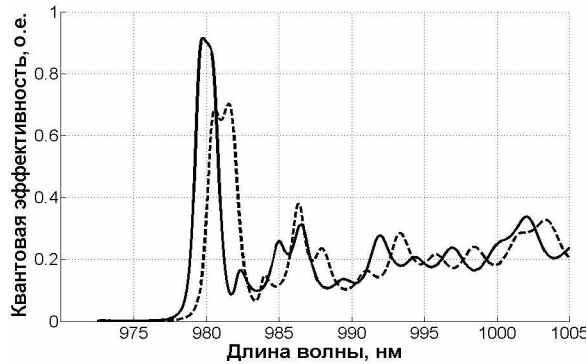


Рис. 3. Квантовая эффективность резонансного фотодетектора с учетом градиента температуры (пунктир) и без учета (сплошная кривая, все слои имеют $T=300^{\circ}\text{K}$)

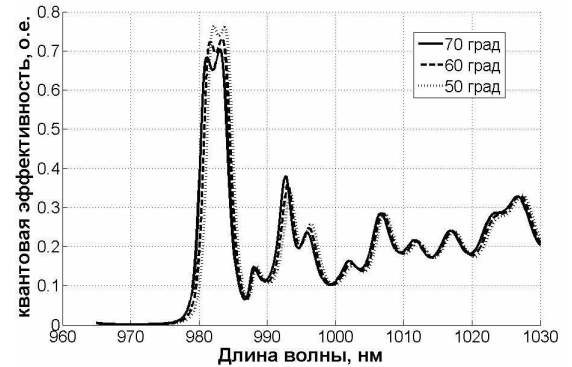


Рис. 4. Квантовая эффективность резонансного фотодетектора при различных температурах подложки

Пунктирной кривой показан результат, соответствующий распределению тепла в структуре на рис. 3. Легко видеть, что температурное воздействие на показатель преломления оказало сильное влияние на спектр квантовой эффективности. Наблюдается уменьшение амплитуды спектрального максимума и “красный” сдвиг. Разница в показателе преломления для $GaAs$ составила $\Delta n (20^{\circ}-70^{\circ})=0.02$. Также стоит отметить, что величина показателя преломления материалов уменьшается от подложки к входному зеркалу. Это является результатом монотонного уменьшения температуры в том же направлении.

На рис. 4 представлен результат расчета спектра квантовой эффективности резонансного детектора при различных температурах подложки. Кривые соответствуют температурам подложки $T_1=70$, $T_2=60$ и $T_3=50$ градусов Цельсия. Деформация плоской вершины спектра и понижение максимума квантовой эффективности является следствием изменения спектральных характеристик. Неравномерное увеличение оптической толщины полупроводниковых слоев Брегговского зеркала приводит к увеличению отражения на резонансной длине волны и смещению спектра квантовой эффективности.

Следует отметить, что данная модель позволяет предсказать изменения в спектре при любом распределении температуры в детекторе. Деградация плато квантовой эффективности будет наблюдаться при любом градиенте температуры в структуре. Положение максимума зависит от оптической толщины слоев Брегговских зеркал поэтому, например, при повышенной температуре входного зеркала относительно подложки максимум квантовой эффективности сместится в коротковолновую область.

ВЫВОДЫ

При изменении температуры на 10° спектральный максимум квантовой эффективности сдвигается в длинноволновую область на 1 нм. В ходе анализа были выявлены следующие закономерности:

- 1) Чем больше увеличивается температурный контраст между подложкой и верхней границей входного зеркала, тем больше разница в показателе преломления Δn . Другими словами, показатель преломления слоя $GaAs$ в выходном зеркале будет больше показателя преломления слоя $GaAs$ в верхнем зеркале;
- 2) Увеличение температуры подложки приводит к уменьшению амплитуды квантовой эффективности и деформации плоской вершины спектра в области резонанса;
- 3) Смещение пика квантовой эффективности обусловлено изменением показателя преломления, следовательно, при увеличении температуры подложки величина смещения также будет расти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Bautista, “The potential benefits of photonics in the computing platform,” Proc. SPIE, 5729, 1 (2005).
2. E. Mohammed, et al., “Optical interconnect system integration for ultra-shortreach applications,” Intel Technology Journal, 8, 115 (2004).
3. M. S. Unlu and S. Strite, “Resonant cavity enhanced photonic devices,” J. Appl. Phys., 78, 607 (1995).
4. Р. Дж.Киес, П.В. Крузе, П.В.Патли и др. Фотоприемники видимого и ИК диапазона / Под ред. Р.Дж. Киеса; Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. - 328 с.
5. Sadao Adachi, “Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds “, (Ed.) (Wiley, 1992).
6. Ковбаса А.А., Зиньковская И. О., Лысак В.В. и др. Отражательные свойства распределенных Брегговских отражателей в комплексе с оксидным окном // «Радиоэлектроника и информатика», 2005, № 3, с.55 – 61.
7. Mario Bertolotti, Victor Bogdanov, et al., Temperature dependence of the refractive index in Semiconductors, J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 7, No. 6/June 1990