

06

Светодиоды ($\lambda = 3.6 \mu\text{m}$) с оптическим возбуждением на основе фотонных кристаллов в арсениде индия

© Ю.М. Задиранов, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская,
С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный,
Н.М. Стусь, А.А. Усикова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2007 г.

Сообщается о влиянии периодического рельефа на поверхности арсенида индия на коэффициент отражения и интенсивность инфракрасного излучения $\lambda = 3.3\text{--}3.6 \mu\text{m}$, выходящего из активной области светодиода, возбужденной с помощью фотонов.

PACS: 78.55.Cr, 78.55.-m, 42.70.Qs

Светодиоды, излучающие в диапазоне длин волн $3\text{--}5 \mu\text{m}$, могут быть использованы в системах безопасности, контроля химического состава газовой среды [1] и в тепловидении в качестве калибровочных источников [2]. Широкое применение таких светодиодов (СД) сдерживается невысокой эффективностью преобразования в световую энергию, что связано в том числе с низким коэффициентом вывода излучения из полупроводникового кристалла, имеющего показатель преломления (\tilde{n}) по крайней мере в три раза больший, чем у воздуха.

Для снижения потерь, связанных с полным внутренним отражением, было предложено использовать структуры с микрорезонаторами, с диффузно рассеивающей (текстурированной) поверхностью и/или

с глубокой мезой, имеющей расширение конуса в направлении вывода излучения и выполняющей функцию встроенного рефлектора [3]. Одним из наиболее перспективных направлений является использование двумерных фотонных кристаллов (ФК), позволяющих наложить дифракционные условия на волновой вектор выходящих из оптически плотной среды (полупроводника) фотонов и увеличить тем самым эффективный угол полного внутреннего отражения [4,5]. Формирование двумерного периодического рельефа на световыводящей поверхности было широко использовано при создании светодиодов видимого и ближнего ИК-диапазона, однако для средней ИК-области спектра ($3 \div 5 \mu\text{m}$) имелись лишь единичные работы, в которых исследования были ограничены светодиодами с поверхностным рельефом, не создающим фотонных зон [3,6].

В работе мы впервые приводим данные об оптических свойствах арсенида индия, на поверхности которого сформирован ФК, а также первые предварительные результаты по созданию оптически возбуждаемых СД на основе InAs с ФК. К числу достоинств таких светодиодов относится простота изготовления, поскольку процессы создания мезы, контактов и формирование p - n -перехода в узкозонных гетероструктурах в данном случае не являются обязательно необходимыми.

Нами исследовались образцы, представляющие собой плоскопараллельные пластины n -InAs(111) $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ и эпитаксиальные структуры n^0 -InAs/ n^+ -InAs(111) ($n^0 \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $n^+ = 2 \div 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), в которых методами стандартной фотолитографии с использованием „сухого“ (ионно-лучевого) травления был сформирован рельеф/ФК, состоящий из гексагонально упакованных элементов с характерным размером $0.5 \div 2 \mu\text{m}$ и шагом между элементами $\sim 3 \mu\text{m}$. Спектры люминесценции и отражения измерялись при комнатной температуре; в последнем случае падающие и отраженные лучи были близки к нормали к поверхности. В зависимости от режимов можно было получать рельеф как в виде пирамид, так и в виде ямок. На данном этапе работы наиболее выраженные свойства, характерные для фотонных кристаллов, были получены на образцах с рельефом последнего вида, и в дальнейшем все данные будут приведены для образцов именно этого типа.

На рис. 1, *b* показаны относительные интенсивности фотолюминесценции, измеренные в геометрии „на просвет“ при возбуждении „плоской“ (без рельефа) поверхности пластин n -InAs размером $\sim 2 \times 2 \text{ mm}$

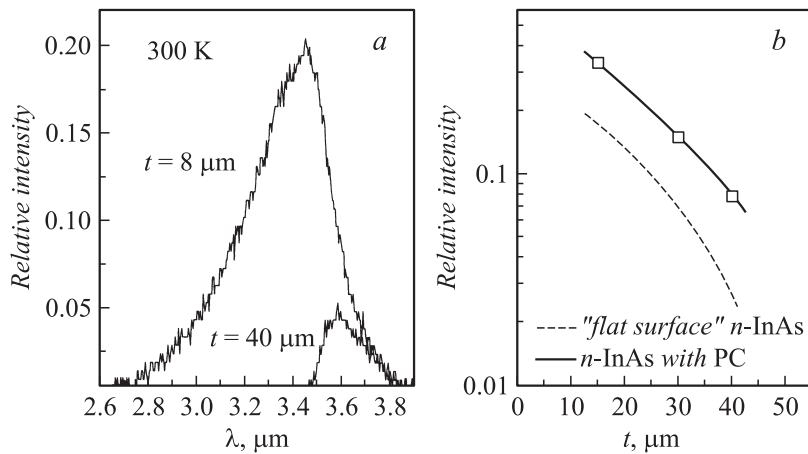


Рис. 1. Спектры люминесценции плоскопараллельной пластины InAs толщиной $t \sim 8$ и $\sim 40 \mu\text{m}$ с ФК на излучающей поверхности и оптической накачкой со стороны поверхности, свободной от микрорельефа (a); зависимость интенсивности фотолюминесценции от толщины пластины в геометрии на просвет для образцов с ФК на излучающей поверхности и без него (b).

с разными толщинами. При этом возбуждение осуществлялось полупроводниковым лазером $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, а регистрация излучения проводилась со стороны пластины, имеющей рельеф; угол сбора излучения составлял $\sim 30'$. На рис. 1, a приведены спектры фотолюминесценции для образцов толщиной 10 и $40 \mu\text{m}$, измеренные „на просвет“, форма которых не зависела от наличия или отсутствия рельефа в образце. Как видно из рис. 1, создание периодического рельефа увеличивает интенсивность люминесценции приблизительно в два раза по сравнению с „плоскими“ образцами. Отметим, что увеличение вывода излучения происходит на фоне существенного поглощения выходящего из n-InAs излучения, следствием которого являются уменьшение полуширины и сдвиг максимума спектра в длинноволновую область с 3.45 до $3.6 \mu\text{m}$ в „толстых“ образцах.

Полученные при исследовании образцов n-InAs режимы и оптимальные геометрические характеристики периодического рельефа были использованы при создании прототипов светодиодов с оптическим возбуждением (см. рис. 2), в которых в качестве накачивающего ис-

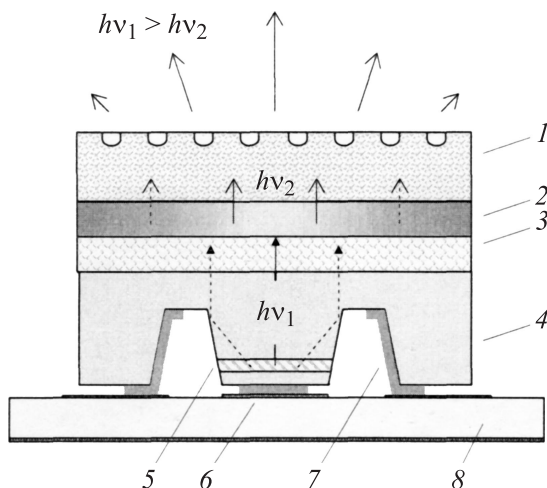
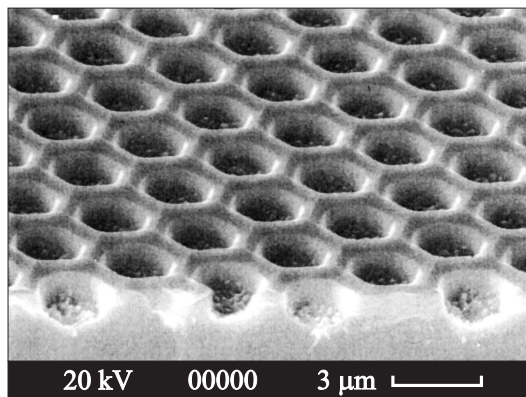


Рис. 2. Схема оптически возбуждаемого светодиода с фотонным кристаллом (нижняя часть рисунка), где *1* — прозрачная подложка n^+ -InAs с нанесенным на ее поверхности периодическим рельефом, *2* — эпитаксиальный слой n^0 -InAs, *3* — оптический клей, *4* — накачивающий светодиод из арсенида галлия, смонтированный по методу флип-чип, в котором *5* — активная область p - n -перехода, *6* — анод, *7* — катод, *8* — кремниевый носитель и СЭМ-фотография световыводящей поверхности n^+ -InAs (верхняя часть рисунка), где горизонтальная белая линия соответствует расстоянию в $3\ \mu\text{m}$.

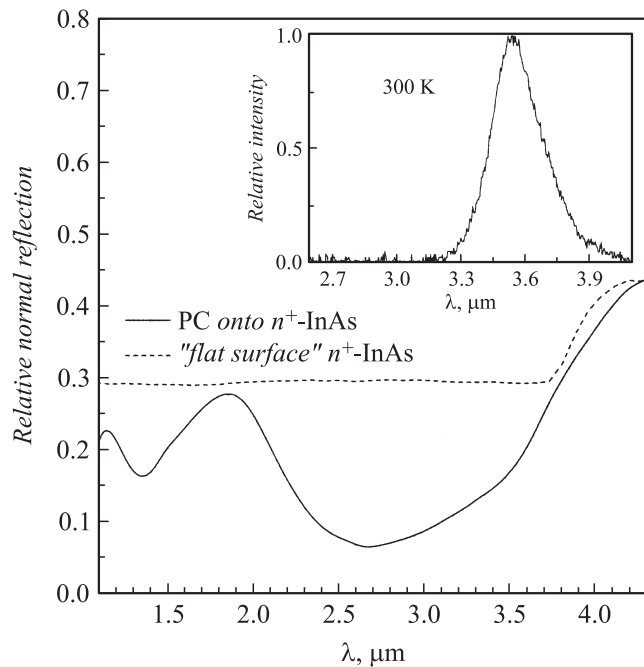


Рис. 3. Коэффициенты нормального к поверхности отражения плоскопараллельных пластин n -InAs толщиной $350 \mu\text{m}$ (пунктирная линия) и структур n^0 -InAs/ n^+ -InAs толщиной $500 \mu\text{m}$ с фотонным кристаллом на поверхности n^+ -InAs (сплошная линия).

точника с энергией фотонов $h\nu_1$ был использован светодиод из GaAs ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$) (4), а поглощение выходящего из фотовозбужденной области (2) излучения в сильнолегированной подложке n^+ -InAs (111) толщиной $\sim 500 \mu\text{m}$ (1) уменьшено вследствие вырождения электронов в зоне проводимости (эффекта Мосса–Бурштейна) [7]. Активный слой нелегированного n^0 -InAs толщиной $8\text{--}14 \mu\text{m}$ был оптически состыкован с накачивающим светодиодом с помощью халькогенидного стекла с показателем преломления $\tilde{n} = 2.4$; это обеспечивает существенное увеличение мощности накачки благодаря уменьшению потерь, связанных с полным внутренним отражением возбуждающего излучения. Гексагонально упакованные отверстия (см. рис. 2, сверху), как и в образцах n -InAs, описанных выше, создавали блокировку отражения на

длинах волн $\sim 2.4 \div 3, 1.3 \div 1.6 \mu\text{m}$ — длинах волн, приблизительно кратных периоду элементов рельефа ($3 \mu\text{m}$), как показано на рис. 3; при этом увеличение эффективности светодиодов, достигнутое за счет взаимодействия фотонов с ФК, составило так же, как в случае с образцами $n\text{-InAs}$, около 2 раз. Полученный коэффициент увеличения выхода излучения (K) оказался существенно меньше, чем для СД из PbSe ($K = 6$ [6]), что, вероятно, связано с тем, что мы имеем дело с образцами с меньшим, чем у PbSe , показателем преломления ($\tilde{n}_{\text{PbSe}} = 4.6, \tilde{n}_{\text{InAs}} = 3.5$). Не исключено также, что реальное значение \tilde{n}_{InAs} в нашем случае может быть меньше, чем 3.5, в силу его заметного уменьшения при высоком уровне легирования примесью n -типа [3].

Отметим, что параметры приведенных светодиодов не являются оптимальными, а потому они существенно уступают, например, по выходной мощности известным СД с электрической инжекцией [3], прежде всего из-за большой толщины использованных подложек ($\sim 500 \mu\text{m}$) и поглощения части выходящего из активной области излучения; так, для аналогичных кристаллов $n^+\text{-InAs}$, использованных при создании флип-чип СД на длину волны $3.3 \mu\text{m}$, образцы утонялись до $\sim 200 \mu\text{m}$ и менее [3]. Кроме этого толщина активного слоя также не оптимизирована. Оба фактора имеют следствием относительно большое значение длины волны в максимуме ($3.55 \mu\text{m}$, см. вставку к рис. 3, где показан спектр излучения светодиода). В этой связи ближайшей задачей авторы видят отработку методов получения фотонных кристаллов на утоненных и оптимизированных структурах, полученных на подложке InAs , включая создание светодиодов повышенной яркости с электрической инжекцией.

Работа поддержана СПбНЦ РАН и Седьмой рамочной программой (FP7)ЕС.

Список литературы

- [1] Кузнецов А.А., Балашов О.Б., Васильев Е.В., Логинов С.А., Луговской А.И., Черняк Е.Я. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. В. 6. С. 55–59.
- [2] Malyutenko V.K., Malyutenko O.Yu., Zinovchuk A.V. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 201114.
- [3] Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. // ФТП. 2008. Т. 42. В. 6. С. 641.

- [4] *Ichikawa H., Baba T.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. N 4. P. 457–459.
- [5] *Pralle M.U., Moelders N., McNeal M.P., Puscasu I., Greenwald A.C., Daly J.T., Johnson E.A., George T., Choi D.S., El-Kady I., Biswas R.* // Appl. Phys Lett. 2002. V. 81. N 25. P. 4685–4687.
- [6] *Weik F., Tomm J.W., Glatthaar R.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 041106.
- [7] *Dixon J.R., Ellis J.M.* // Phys. Rev. 1961. V. 123. P. 1560.