

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

СибОптика-2015

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2015

УДК 535
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГУГиТ, Новосибирск
А. В. Шабурова

Доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств
и технологий СГУГиТ, Новосибирск
В. С. Айрапетян

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии
и технологии оптического производства СГУГиТ, Новосибирск
О. В. Минин

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем
и оплотехники СГУГиТ, Новосибирск
Д. В. Чесноков

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля
2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. ма-
териалов в 3 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 272 с.

ISBN 978-5-87693-821-3 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-818-3

ISBN 978-5-87693-795-7

В сборнике опубликованы материалы XI Международного научного конгресса «Ин-
терэкспо ГЕО-Сибирь-2015», представленные на Международной научной конференции
«СибОптика-2015».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-821-3 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-818-3

ISBN 978-5-87693-795-7

© СГУГиТ, 2015

Сборник включен в систему РИНЦ.

СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ CdHgTe ДЛЯ ФОТОНИКИ

Александр Васильевич Войцеховский

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники и фотоники, тел. (3822)41-27-72, e-mail: vav43@mail.tsu.ru

Дмитрий Игоревич Горн

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптической электроники, тел. (3822)41-35-15, e-mail: gorn_dim@sibmail.com

Сергей Алексеевич Дворецкий

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией технологии эпитаксии из молекулярных пучков соединений A^2B^6 , тел. (383)330-49-67, e-mail: dvor@isp.nsc.ru

Николай Николаевич Михайлов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории технологии эпитаксии из молекулярных пучков соединений A^2B^6 , тел. (383) 330-49-67, e-mail: mikhailov@isp.nsc.ru

В данной статье представлен анализ имеющихся в настоящее время экспериментальных работ по получению лазерной генерации в структурах $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) с множественными квантовыми ямами (МКЯ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Для рассмотренных структур было проведено моделирование электронного спектра носителей заряда в квантовой яме, рассчитаны энергии оптических переходов и дана интерпретация наблюдаемых в экспериментах пиков спонтанного и стимулированного излучения.

Ключевые слова: КРТ МЛЭ, множественные квантовые ямы, расчёт спектров, лазерная генерация.

PROPERTIES OF CdHgTe BASED NANOSTRUCTURES WITH QUANTUM WELLS FOR PHOTONICS

Alexander V. Voitsekhovskii

Tomsk state university, 634050, Russia, Tomsk, 36 Lenina Av., Ph. D., professor, head of quantum electronics and photonics department, tel. (3822)41-27-72, e-mail: vav43@mail.tsu.ru

Dmitry I. Gorn

Tomsk state university, 634050, Russia, Tomsk, 36 Lenina Av., Ph. D., senior scientist of optical electronics laboratory, tel. (3822)41-35-15, e-mail: gorn_dim@sibmail.com

Sergey A. Dvoretzkii

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 13, Ac. Lavrentieva ave., Ph. D., head of A^2B^6 compounds MBE technology laboratory, tel. (383)330-49-67, e-mail: dvor@isp.nsc.ru

Nikolay N. Mikhailov

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 13, Ac. Lavrentieva ave., Ph. D., senior scientist of A²B⁶ compounds MBE technology laboratory, tel. (383)330-49-67, e-mail: mikhailov@isp.nsc.ru

This article presents an analysis of the currently available experimental works devoted to the obtaining laser generation in Cd_xHg_{1-x}Te (MCT) structures with multiple quantum well (MQW) grown by molecular beam epitaxy (MBE). Electron spectra of charge carriers in the quantum well were simulated for structures under consideration. Also the optical transitions energies were calculated and interpretations of experimentally observed peaks of spontaneous and stimulated emission were given.

Key words: MCT MBE, multiple quantum wells, calculation of optical spectra, laser generation.

Одним из перспективных направлений в области создания эффективных излучателей среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазона является применение в качестве активной области излучателя наноструктур с квантовыми ямами (КЯ) на основе узкозонного твёрдого раствора Cd_xHg_{1-x}Te (КРТ).

Применение квантовых ям в излучательных структурах при определённых условиях позволяет существенно снизить скорость Оже-рекомбинации за счёт изменения функции плотности электронных состояний в КЯ и появления запретов на некоторые типы оптических переходов. Например, ещё в [1] было теоретически показано, что применение квантовых ям на основе КРТ может позволить снизить скорость безызлучательной Оже-рекомбинации в несколько десятков раз.

В данной работе мы рассмотрим имеющиеся на настоящий момент наработки по вопросу получения стимулированного излучения в ИК-диапазоне в структурах на основе КРТ с квантовыми ямами. Также нами будет проведён анализ представленных в рассмотренных работах экспериментальных данных и по возможности будет дана интерпретация наблюдаемого излучения. Теоретический анализ будем проводить на основании модели самосогласованного потенциала полупроводниковой гетероструктуры, основанной на совместном численном решении уравнений Пуассона и Шрёдингера для структуры с КЯ [2-5].

В работе [6] представлены экспериментальные спектры наблюдения спонтанного и стимулированного излучения с максимумом спектральной характеристики на длине волны 2,85 мкм и 2,75 мкм соответственно. Авторами рассматривалась структура с множественными квантовыми ямами Cd_{0,37}Hg_{0,63}Te (16,6 нм) / Cd_{0,85}Hg_{0,15}Te (6 нм), состоящая из 30 периодов, выращенная методом МЛЭ. Накачка в эксперименте осуществлялась Nd:YAG лазером в непрерывном режиме. Полученные в работе спектры представлены на рис. 1. Оценочный расчёт даёт следующие результаты. Наиболее близким по энергии к наблюдаемым линиям люминесценции является излучательный переход $c_2 \rightarrow hh_2$ между вторым уровнем размерного квантования электронов и вторым уровнем квантования тяжёлых дырок. Этот переход осуществляется на длине волны 2,77

мкм при температуре 5 К и 2,73 мкм при температуре 60 К. Расчетное значение в хорошей степени согласуется с наблюдением при высокой температуре.

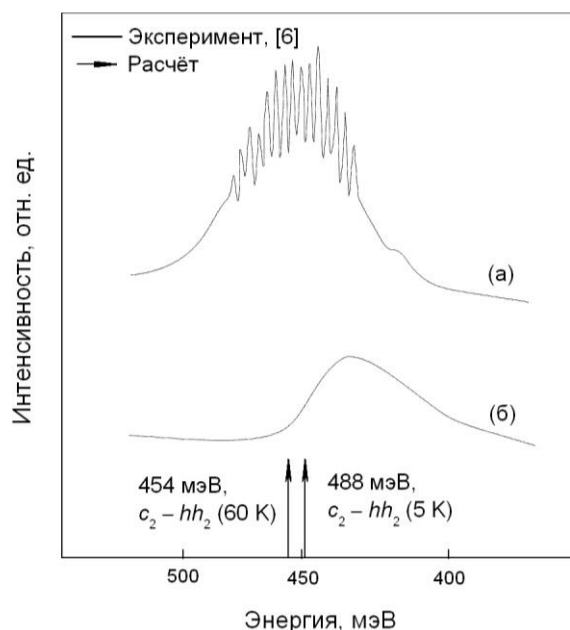


Рис. 1. Спектры спонтанного и стимулированного излучения 30-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0,37}\text{Hg}_{0,63}\text{Te}$ (16,6 нм) / $\text{Cd}_{0,85}\text{Hg}_{0,15}\text{Te}$ (6 нм) при температуре ~ 60 К (а, стимулированное излучение) и 5 К (б, фотолюминесценция). Кривые – экспериментальные данные [6], стрелки – расчёт энергии переходов

Авторами [7] рассматривалась структура с МКЯ $\text{Cd}_{0,33}\text{Hg}_{0,67}\text{Te}$ / $\text{Cd}_{0,55}\text{Hg}_{0,45}\text{Te}$ с толщиной ямы и барьера, соответственно, 10 и 7 нм. Структура, состоящая из 5 периодов находится в центре волноводного слоя КРТ с составом $x = 0,33$ мол. дол., образующего резонатор в структуре. Чтобы избежать чрезмерного нагрева образца, возбуждение люминесценции в структуре осуществлялось импульсным Nd:YAG лазером с модулированной добротностью. На рис. 2 представлены спектры излучения данной структуры при температуре 12 К. Расчёт в данном случае предсказывает переход $c_2 \rightarrow hl_2$ на длине волны 2,24 мкм между вторыми уровнями размерного квантования электронов и лёгких дырок.

В работе [8] описан порог лазерной генерации в структуре с МКЯ, состоящей из 5 периодов $\text{Cd}_{0,35}\text{Hg}_{0,65}\text{Te}$ (яма) / $\text{Cd}_{0,55}\text{Hg}_{0,45}\text{Te}$ (барьер) с толщиной ям и барьеров 15 и 10 нм, соответственно. Для всех рассмотренных в работе образцов авторы наблюдали две полосы спонтанного излучения, соответствующие излучению в ямах и барьерах.

Для образца с МКЯ энергия E_g материала ямы при температуре 10 К составляет величину 312 мэВ. При этом энергия линии излучения, составляющая величину порядка 360 мэВ, близка к энергии переходов в яме $c_1 \rightarrow hl_1$ (363 мэВ)

и $c_1 \rightarrow hh_1$ (343 мэВ), что подтверждает природу наблюдаемого пика, как обусловленного переходами в КЯ.

В работе [9] рассматривались структуры с градиентными слоями. МКЯ в данной структуре состояла из 5 периодов $\text{Cd}_{0,44}\text{Hg}_{0,56}\text{Te}$ (15 нм) / $\text{Cd}_{0,59}\text{Hg}_{0,41}\text{Te}$ (6,5 нм). Данная структура сравнивалась с гетероструктурой, включающей потенциальную яму с составом КРТ $x = 0,44$ и окружённой волноводным слоем с составом 0,7 мол. дол. Авторами было показано, что наличие в активной области структуры с МКЯ, а также градиентных слоёв существенно снижает порог лазерной генерации.

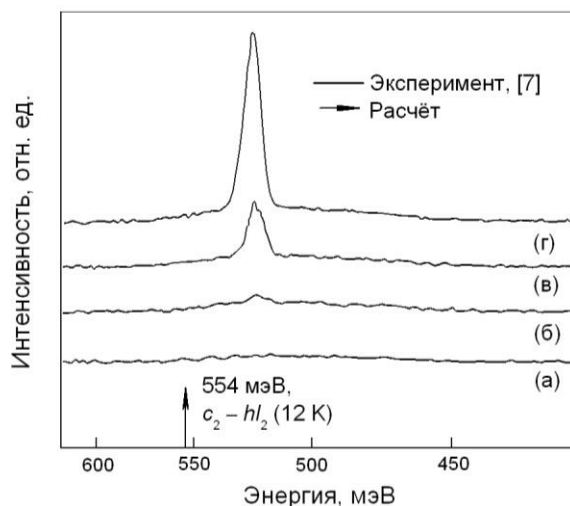


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения 5-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0,33}\text{Hg}_{0,67}\text{Te}$ (10 нм) / $\text{Cd}_{0,55}\text{Hg}_{0,45}\text{Te}$ (7 нм) при температуре 12 К при различной плотности мощности накачки. Кривые – экспериментальные данные [7], стрелки – расчёт энергии переходов. Плотность мощности излучения накачки:

а – 1,1 кВт/см², б – 2,2 кВт/см², в – 2,9 кВт/см², г – 4,4 кВт/см²

В работе [10] была изготовлена структура в виде резонатора Фабри-Перо, образованная постростовым нанесением диэлектрических зеркал на структуру с активной областью, состоящей из 5 квантовых ям $\text{Cd}_{0,32}\text{Hg}_{0,68}\text{Te}$ толщиной 14 нм, разделённых барьерами из $\text{Cd}_{0,6}\text{Hg}_{0,4}\text{Te}$ толщиной 10 нм. Авторам удалось получить лазерную генерацию в подобной структуре при комнатной температуре. В работе [11] также сообщается о наблюдении стимулированного излучения в структуре с 5-периодной МКЯ $\text{Cd}_{0,59}\text{Hg}_{0,41}\text{Te}$ (14 нм) / $\text{Cd}_{0,75}\text{Hg}_{0,25}\text{Te}$ (10 нм) при комнатной температуре.

Все рассмотренные в данной статье публикации, посвящённые получению лазерного излучения в структурах с квантовыми ямами на основе КРТ, относятся к периоду 1989-1999 гг. Насколько известно авторам данной статьи, после этого работ в рассматриваемом направлении, описывающих результаты, отличные от приведённых выше, опубликовано не было. При этом также известно, что в настоящее время не существует промышленно производимых приборов

оптоэлектроники, основанных на использовании квантовых ям и сверхрешёток КРТ. Исследования так и не дошли до получения приборно-ориентированной электролюминесценции и создания инжекционных лазеров, использующих все преимущества квантовых ям на основе КРТ.

Ослабление интереса к данной научной проблеме в 2000-х годах, вероятно, было сопряжено с технологической сложностью и дороговизной изготовления многослойных наноструктур на основе материала КРТ. В настоящее время эта ситуация существенно выправилась благодаря прорывному развитию метода МЛЭ, и приблизительно с 2008 года начали появляться новые работы в данном направлении – посвящённые исследованию фотолюминесценции в структурах КРТ с КЯ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Jiang Y. Carrier Lifetimes and Threshold Currents in HgCdTe Double Heterostructure and Multi-quantum-Well Lasers / Y. Jiang, M.C. Teich, W.I. Wang // *J. Appl. Phys.* – 1991. – Vol. 69 (10). – P. 6869-6875.
- 2 Voitsekhovskii A.V. Energy-band diagrams and capacity-voltage characteristic of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -based variband structures calculated with taking into account the dependence of electron affinity on a composition / A.V. Voitsekhovskii, D.I. Gorn, S.N. Nesmelov, A.P. Kokhanenko // *Opto-Electronics Review.* – 2010. – Vol. 18, N 3. – P. 241-245.
- 3 Analysis of the photoluminescence spectra of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ heteroepitaxial structures with potential and quantum wells grown by molecular-beam epitaxy / A.V. Voitsekhovskii, D.I. Gorn, I.I. Izhnin, A.I. Izhnin, V.D. Goldin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretiskii, Yu.G. Sidorov, M.V. Yakushev, V.S. Varavin // *Russian Physics Journal.* – 2013. – V. 55, N 8. – P. 910-916.
- 4 Voitsekhovskii A.V. Electrophysical characteristics of metal-insulator-semiconductor structures comprising CdHgTe-based quantum wells / A.V. Voitsekhovskii, D.I. Gorn // *Advanced Materials Research.* – 2014. – V. 1040. – P. 34-38.
- 5 An Investigation into the Admittance of MIS-Structures Based on MBE HgCdTe with Quantum Wells / S.M. Dzyadukh, A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.A. Dvoretiskii, N.N. Mikhailov, D.I. Gorn // *Russian Physics Journal.* – 2013. – V. 56, N 7. – P. 778–784.
- 6 Stimulated emission at 2.8 μm from Hg-based quantum well structures grown by photoassisted molecular beam epitaxy / N.C. Giles, J.W. Han, J.W. Cook Jr., J.F. Schetzina // *Applied Physics Letters.* – 1989. – V. 55. – P. 2026-2028.
- 7 Stimulated emission from $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayer and $\text{CdTe}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ heterostructures grown by molecular-beam epitaxy / K.K. Mahavadi, S. Sivananthan, M.D. Lange, X. Chu, J. Bleuse, J.P. Faurie // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1990. – V. 8 (2). – P. 1210–1214.
- 8 Cavity structure effects on CdHgTe photopumped heterostructure lasers / J. Bleuse, N. Magnea, J.-L. Pautrat, H. Mariette // *Semicond. Sci. Technol.* – 1993. – V. 8. – P. 5286–5288.
- 9 Optical gain and laser emission in HgCdTe heterostructures / J. Bonnet-Gamard, J. Bleuse, N. Magnea, J. L. Pautrat // *J. Appl. Phys.* – 1995. – V. 78 (12). – P. 6908–6915.
- 10 II-VI infrared microcavity emitters with 2 postgrowth dielectric mirrors / C. Roux, P. Filloux, G. Mula, J.-L. Pautrat // *Journal of Crystal Growth.* – 1999. – V. 201/202. – P. 1036–1039.
- 11 Room-temperature optically pumped CdHgTe vertical-cavity surface-emitting laser for the 1.5 μm range / C. Roux, E. Hadji, and J.-L. Pautrat // *Applied Physics Letters.* – 1999. – V. 75 (12). – P. 1661-1663.

© А. В. Войцеховский, Д. И. Горн, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, 2015