

УДК 620.91

НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ С НЕИДЕНТИЧНЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Г.Ш. ШМАВОНЯН

Государственный инженерный университет Армении, Ереван

(Поступила в редакцию 19 октября 2007 г.)

Получен сверхширокополосный излучательный спектр для полупроводниковых оптических усилителей с несколькими квантовыми ямами на подложке. Спектральная ширина составляет почти 400 нм (1200–1600 нм), что покрывает всю используемую ширину полосы частот оптического волокна. Широкополосные характеристики позволяют наблюдать три новых эффекта: 1) двусторонний направленный эффект лазерной моды в изогнутом волноводе полупроводникового оптического усилителя; 2) оптический переключательный эффект в одном полупроводниковом оптическом усилителе для оптической полосы частот связи и 3) эффект толщины отдельного ограниченного гетероструктурного слоя.

1. Введение

Широкополосные характеристики усилителей представляют значительный интерес для оптико-волоконной связи. Новейшая технология позволяет в оптических волокнах использовать очень большие ширины частот, которые почти покрывают область в 1200–1600 нм с потерями меньше, чем 1 дБ/км. Полупроводниковые оптические усилители зарекомендовали себя как надежные источники света для оптико-волоконной связи. Однако для перекрытия всей используемой ширины частотной полосы оптических волокон необходимо много традиционных полупроводниковых оптических усилителей с различными спектральными областями, потому что каждый усилитель обычно имеет полосу частот меньше, чем 50 нм. Поэтому при расширении полосы частот полупроводниковых оптических усилителей они могут стать более перспективными для применений.

Использование квантовых ям – весьма удобный способ, который имеет широкое применение для решения вопросов излучения или усиления полупроводниковых оптических усилителей. Эта схема включает в себя использование квантовой ямы с одномерными переходами между состояниями $l = 1$ и $l = 2$ [1,2] и использование неидентичных квантовых ям [3–6]. Неоднородное распределение носителей заряда между многочисленными квантовыми ямами было предсказано в работах [7,8]. Впоследствии было также получено косвенное экспериментальное свидетельство этого из характеристик лазерных диодов [9,10]. Однако, неравномерное распределение носителей заряда между квантовыми ямами делает технологию их изготовления довольно сложной – необходимо выбрать правильную

очередность многочисленных квантовых ям [11–21].

В данной работе показано, что спектральная ширина полупроводникового оптического усилителя может быть значительно расширена путем использования тщательно спроектированных нескольких неидентичных квантовых ям, выращенных на подложке, что позволило обнаружить следующие три новых эффекта: 1) двусторонний направленный эффект лазерной моды в изогнутом волноводе полупроводникового оптического усилителя; 2) оптический переключательный эффект в одном полупроводниковом оптическом усилителе для оптической полосы частот связи и 3) эффект толщины отдельного ограниченного гетероструктурного слоя в полупроводниковом оптическом усилителе с изогнутым волноводом.

2. Эксперимент

Для достижения широкополосных характеристик была спроектирована специальная очередность нескольких неидентичных квантовых ям. Квантовые ямы выращивались металлорганическим химическим паровым осаждением. Структуры слоев приведены на рис.1.

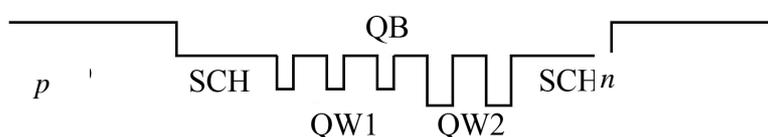


Рис.1. Квантовая структура спроектированных нескольких неидентичных квантовых ям. QW – квантовая яма, QB – квантовый барьер, SCH – отдельная ограниченная гетероструктура.

Три квантовые ямы $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.72}\text{P}_{0.28}$ с шириной 6 нм, спроектированные для длины волны перехода, соответствующего 1300 нм, были выращены вблизи покрывающего *p*-слоя, а две квантовые ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с шириной 15 нм, спроектированные для длины волны перехода 1550 нм, были выращены около покрывающего *n*-слоя. Квантовые барьеры $\text{In}_{0.86}\text{Ga}_{0.14}\text{As}_{0.3}\text{P}_{0.7}$ с шириной 15 нм использовались для отделения квантовых ям.

Была исследована структура квантовых ям из отдельных ограниченных гетероструктурных слоев с разными толщинами. Толщина отдельного ограниченного гетероструктурного слоя $\text{In}_{0.86}\text{Ga}_{0.14}\text{As}_{0.3}\text{P}_{0.7}$ варьируется в пределах от 30 до 120 нм (рис.2). Образцы А и В соответственно имеют отдельные ограниченные гетероструктурные слои с толщинами 120 нм и 80 нм. Толщина отдельного ограниченного гетероструктурного слоя для образца С составляет 30 нм от *p*-стороны и 120 нм – от *n*-стороны (рис.2). Отдельные ограниченные гетероструктурные слои, квантовые барьеры и ямы не легированы. Они прослаиваются между InP *p*- и InP *n*-покрывающими слоями, где *p*-покрывающий слой легирован цинком и имеет концентрацию $p > 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Выше *p*-покрывающего слоя находится верхний слой InGaAs с концентрацией $p > 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. *n*-покрывающий слой также эпитаксиально выращен с концентрацией $n = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для слоя 500 нм и с $n = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для следующего слоя 500 нм. Приборы имеют

гребенчатый, изогнутый волновод длиной 3 мкм. Кроме того, для минимизации усиленного спонтанного излучения длина прибора была сделана по возможности короткой, почти равной 500 мкм. Таким образом, излучательный спектр может непосредственно отражать распределение носителей заряда между различными типами квантовых ям. На гранях приборов покрытия не были использованы.

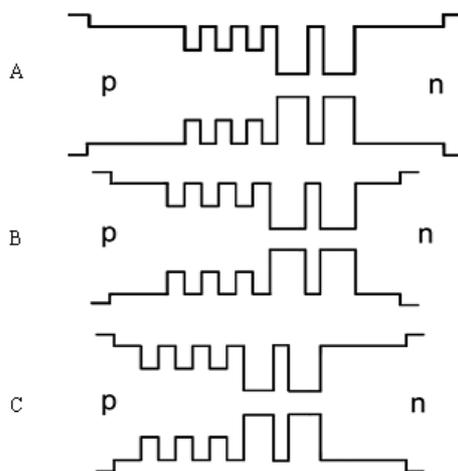


Рис.2. Структуры квантовых ям полупроводникового оптического усилителя с разными отдельными ограниченными гетероструктурными слоями от *p*- и *n*-сторон, А – 120 нм и 120 нм, В – 80 нм и 80 нм, С – 30 нм и 120 нм.



Рис.3. Изображения полупроводникового оптического усилителя (700(300 мкм) со структурой изогнутого волновода, полученные с помощью оптического микроскопа.

Изображения структуры гребенчатого изогнутого волновода длиной 500 мкм с полупроводниковыми оптическими усилителями, полученные с помощью оптического микроскопа, представлены на рис.3. Была использована обычная техника обработки для изготовления полупроводникового оптического усилителя с гребенчатым изогнутым волноводом. Гребенчатый волновод был изготовлен с помощью реактивного ионного травления. Структура и поперечное сечение полупроводникового оптического усилителя представлены на рис.4.

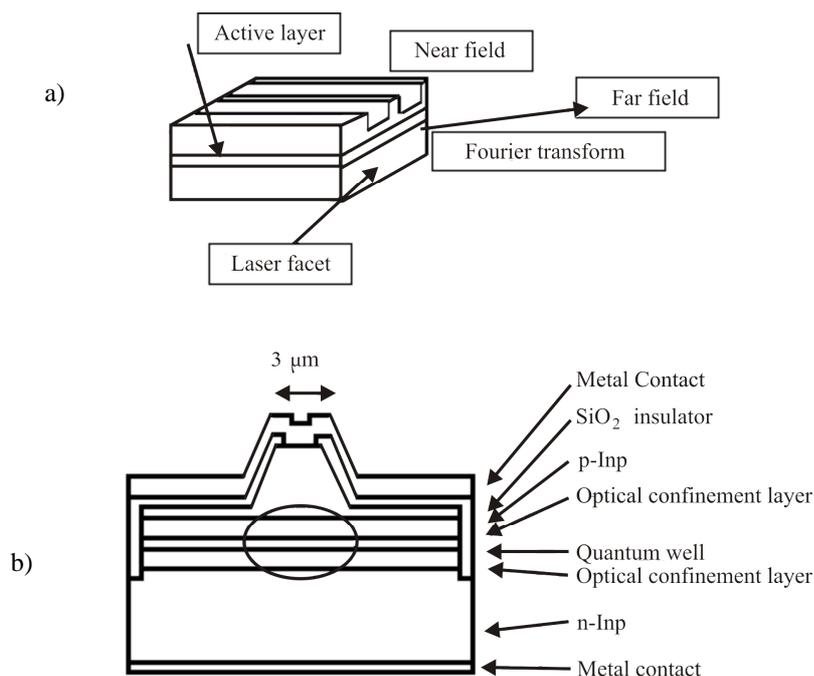


Рис.4. Структура (а) и поперечное сечение (б) полупроводникового оптического усилителя с гребенчатым изогнутым волноводом.

При проектировании широкозонного полупроводникового оптического усилителя со структурой из нескольких неидентичных квантовых ям должны учитываться такие факторы, как переходная энергия квантовой ямы, число и очередность разных квантовых ям, толщина отдельного ограниченного гетероструктурного слоя, отбор доминирующего носителя заряда, способность квантовой ямы к захвату двумерных носителей заряда, равномерность двумерных носителей заряда между квантовыми ямами и т.д. Спроектированные структуры с несколькими неидентичными квантовыми ямами были выращены на InP подложке. При структуре изогнутого типа отражение света от разрезанной грани уменьшается, тем самым уменьшая воздействие резонанса Фабри–Перо.

3. Результаты и обсуждение

Спектры излучения изогнутого волновода полупроводникового оптического усилителя со структурами из нескольких неидентичных квантовых ям (рис.1) и с длиной 500 мкм были экспериментально изучены при разных значениях инжекционного тока. Измеренный спектр излучения оказался предельно широкополосным: спектральная ширина составляла 400 нм, а перекрываемая область была в пределах от 1200 до 1600 нм (рис.5). Таким образом, путем использования одного сверхширокополосного полупроводникового оптического усилителя становится возможным перекрыть всю используемую полосу частот оптического волокна. Как следствие, сверхширокие характеристики усилителя позволяют обнаружить три новых эффекта: 1) двусторонний направленный эффект лазерной моды в

изогнутом волноводе полупроводникового оптического усилителя, 2) оптический переключа-
 тельный эффект в одном полупроводниковом оптическом усилителе для оптической полосы
 частот связи и 3) эффект толщины отдельного ограниченного гетероструктурного слоя.

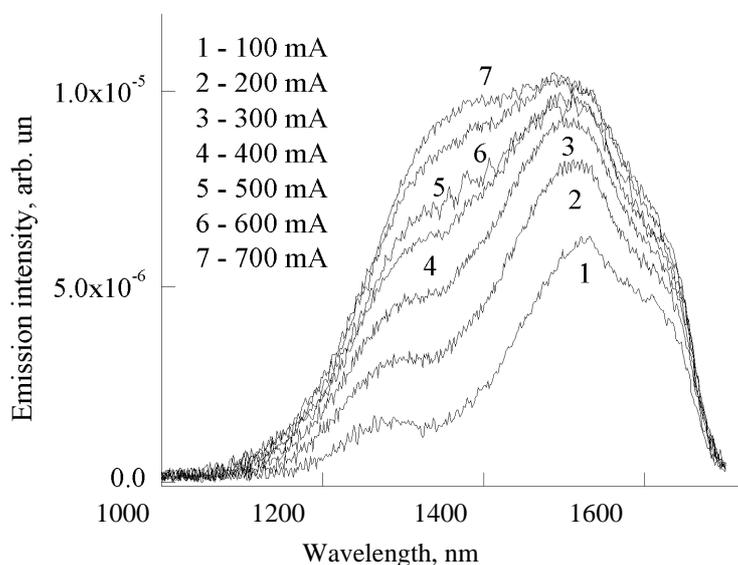


Рис.5. Излучательные спектры полупроводникового оптического усилителя с изогнутым волноводом при разных значениях инжекционного тока.

Сущность первого эффекта заключается в следующем. Экспериментально были исследованы излучательные спектры от прямой стороны (1-й случай), изогнутой стороны (2-й случай), и прямой стороны, идущей от изогнутой стороны того же согнутого волновода (3-й случай) полупроводникового оптического усилителя при разных значениях инжекционного тока (рис.3). Для сверхширокополосных полупроводниковых оптических усилителей с изогнутым волноводом для структур из нескольких неидентичных квантовых ям обнаружено, что оптический путь сильно влияет на излучательные характеристики. Интенсивность света и излучательные спектры для трех случаев весьма отличаются (рис.6–8). Новое двумерное распространение было обнаружено в мелко травленном изогнутом гребенчатом волноводе. Лазерный луч распространяется по двум различным направлениям – прямому и изогнутому. Достигнутая конфигурация дальнего поля весьма разная до и после лазерного излучения. Это происходит из-за двумерного направленного эффекта лазерной моды.

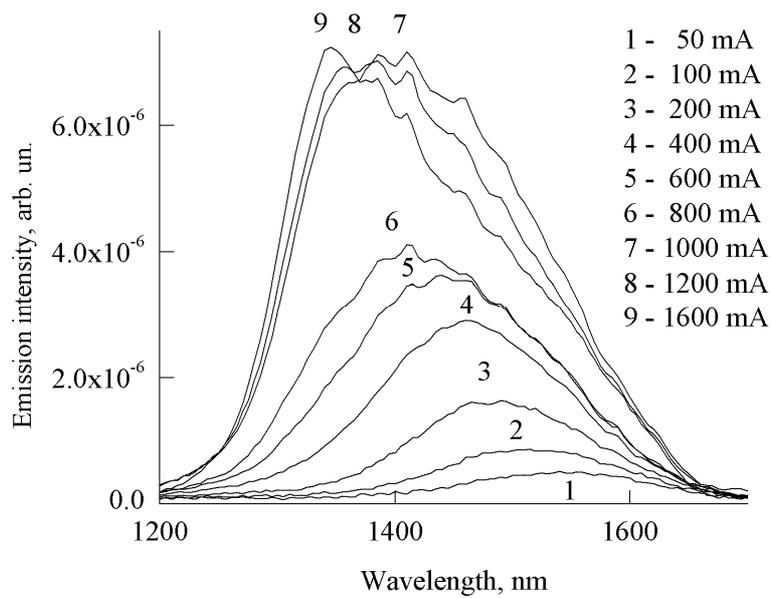


Рис.6. Излучательные спектры полупроводникового оптического усилителя для первого случая при разных значениях инжекционного тока.

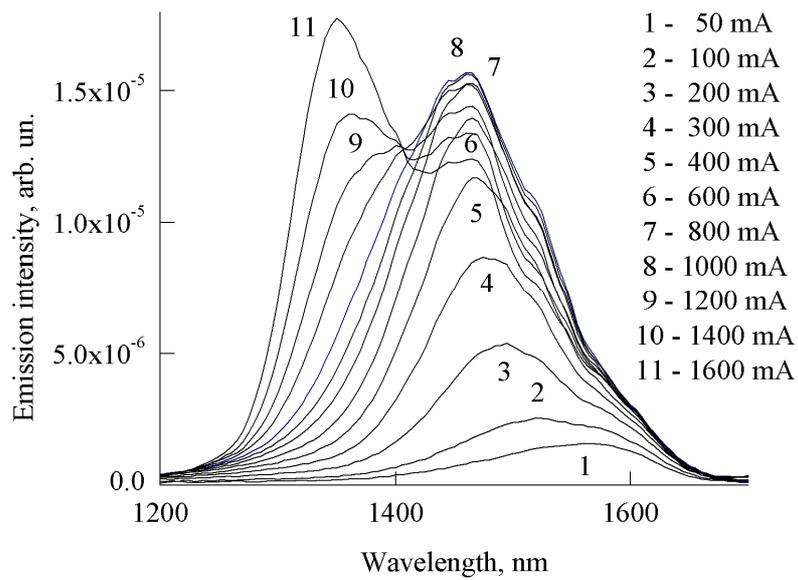


Рис.7. Излучательные спектры полупроводникового оптического усилителя для второго случая при разных значениях инжекционного тока.

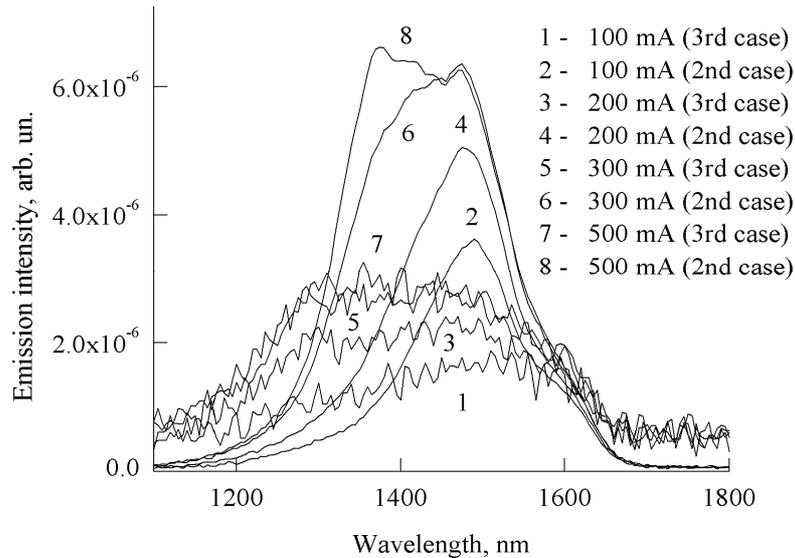


Рис.8. Излучательные спектры полупроводникового оптического усилителя для третьего и второго случаев при разных значениях инжекционного тока.

Сущность второго эффекта заключается в следующем. Экспериментально исследовалось переключение длины волны между полосами на 1550 нм и 1300 нм в одном полупроводниковом оптическом усилителе со структурой из нескольких неидентичных квантовых ям (рис.1). Контроль оптического переключения возможен благодаря перераспределению носителей заряда между квантовыми ямами. Таким образом, использование соответствующей структуры из нескольких квантовых ям позволяет переключаться с одной наиболее используемой длины волны (1540–1445 нм) на другую (1378–1348 нм) в оптической системе связи, используя при этом один полупроводниковый оптический усилитель (рис.9).

Сущность третьего эффекта заключается в следующем. Отдельный ограниченный гетероструктурный слой оказывает значительное воздействие на распространение носителей заряда между несколькими неидентичными квантовыми ямами и на излучательный спектр полупроводникового оптического усилителя. Уменьшение толщины отдельного ограниченного гетероструктурного слоя от *p*-стороны может улучшить равномерность распределения носителей заряда между несколькими квантовыми ямами (рис.2). При изменении толщины отдельного ограниченного гетероструктурного слоя от *p*-стороны в пределах от 120 нм до 30 нм рабочий ток полупроводникового оптического усилителя уменьшается от 500 мА до 160 мА, когда спектральная ширина при значении полной ширины / полумаксимум высоты больше, чем 270 нм.

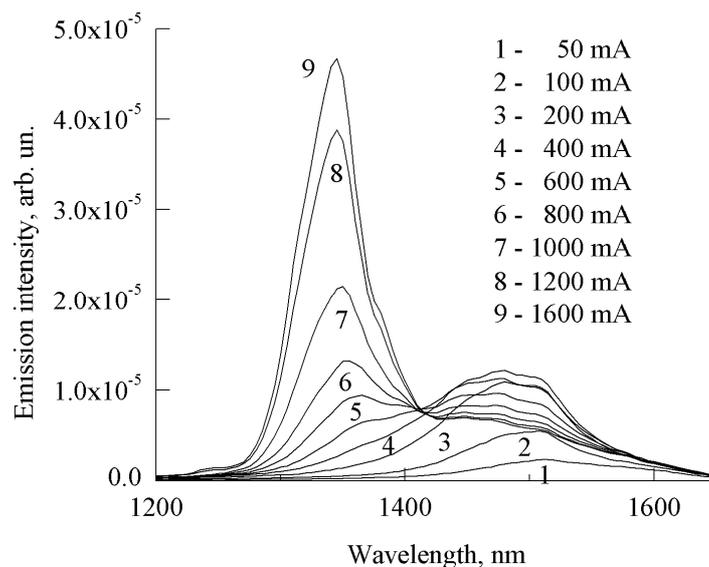


Рис.9. Излучательные спектры полупроводникового оптического усилителя при разных значениях инжекционного тока.

4. Заключение

Использование структур с несколькими неидентичными квантовыми ямами позволяет получить чрезвычайно широкий спектр излучения полупроводникового оптического усилителя. Получена спектральная ширина, которая покрывает область от 1200 нм до 1600 нм. Такие широкополосные характеристики позволяют обнаружить следующие три эффекта: 1) двусторонний направленный эффект лазерной моды в изогнутом волноводе полупроводникового оптического усилителя, 2) оптический переключательный эффект в одном полупроводниковом оптическом усилителе для оптической полосы частот связи и 3) эффект толщины отдельного ограниченного гетероструктурного слоя.

Автор благодарит НАТО за грант FEL.RIG980772, профессора Ч.-Ф. Лина (Национальный Тайванский Университет, Тайбей), Й.Шварца и С.Корзине (Аджилент Текнолоджиз, США) – за плодотворное сотрудничество, и академика В.М. Арутюняна (Ереванский государственный университет) – за полезные обсуждения и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.T.Semenov, V.R.Shidlovski, S.A.Safin.** Electron. Lett., **29**, 854 (1993).
2. **T.R.Chen, L.Eng, Y.H.Zhuang, A. Yariv.** Appl. Phys. Lett., **56**, 1345 (1990).
3. **C.-F.Lin, B.-L.Lee, P.-C.Lin.** IEEE Photon. Technol. Lett., **8**, 1456 (1996).
4. **X.Zhu, D.Cassidy, M.Hamp, D.Thompson, B.Robinson, Q.Zhao, M.Davies.** IEEE Photon. Technol. Lett., **9**, 1202 (1997).
5. **H.S.Gingrich, D.R.Chumney, S.-Z.Sun, S.D.Hersee, L.F.Lester, S.R.Brueck.** IEEE Photon. Technol. Lett., **9**, 155 (1997).
6. **C.-F.Lin, B.-L.Lee,** Appl. Phys. Lett., **71**, 1598 (1993).
7. **N.Tessler, G.Eisenstein.** IEEE J. Quantum Electron., **29**, 1586 (1993).

8. **R.Nagarajan, T.Fukushima, S.W.Corzine, J.E.Bowers.** Appl. Phys. Lett., **59**, 1835 (1991).
9. **H.Yamazaki, A.Tomita, M.Yamaguchi, Y.Sasaki.** Appl. Phys. Lett., **71**, 767 (1997).
10. **B.-L.Lee, C.-F.Lin, J.-W.Lai, W.Lin.** Electron. Lett., **34**, 1230 (1998).
11. **C.-F.Lin, Y.-S.Su, C.-H.Wu, G.Sh.Shmavonyan.** IEEE Photon. Techn. Lett., **16**, 1441 (2004).
12. **C.-W.Tsai, Y.-C.Chang, G.Sh.Shmavonyan, Y.-S.Su, C.-F.Lin.** SPIE Proc., **4989**, 69 (2003).
13. **D.-K.Yu, G.Sh.Shmavonyan, Y.-S.Su, C.-F.Lin.** SPIE Proc., **4986**, 412 (2003).
14. **C.-F.Lin, C.-W.Tsai, Y.-S.Su, G.Sh.Shmavonyan.** Proc. of the Conference on Optical Amplifiers and Their Applications, Otaru, Japan, July 6–9, 2003, p.121.
15. **C.-W.Tsai, G.Sh.Shmavonyan, Y.-S.Su, C.-F.Lin.** IEEE Proc., CLEO/Pacific Rim 2003, **1**, 54 (2003).
16. **G.Sh.Shmavonyan.** Bull. Amer. Phys. Soc., **52**, 1049 (2007).
17. **G.Sh.Shmavonyan.** J. Science World, National Academy Press, Armenia, **1**, 53 (2007).
18. **T.Tchelidze, E.Chikoidze, G.Sh.Shmavonyan, T.Kereselidze.** Phys. Stat. Sol. (c), **3**, 540 (2006).
19. **G.Sh.Shmavonyan.** IEEE Proc. of ICSICT, **1**, 890 (2006).
20. **G.Sh.Shmavonyan.** Bull. Amer. Phys. Soc., **51**, 651 (2006).
21. **G.Sh.Shmavonyan.** Proc. of the 13th Int. Workshop on Physics of Semiconductor Devices, New Delhi, India, December 13–17, 2005, vol.1, p.187.

ՆՈՐ ԵՐԵՎՈՒՅՑԹՆԵՐ ԳԵՐԼԱՅՆԱՇԵՐՏ, ԱՆՀԱՎԱՍԱՐԱԶԱՓ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ՓՈՍԵՐՈՎ
ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐՆԵՐՈՒՄ

Գ.Շ. ՇՄԱՎՈՆՅԱՆ

Հարթակի վրա մշակված բազմակի քվանտային փոսերով կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարների համար ստացված է գերլայնաշերտ ճառագայթման սպեկտր: Սպեկտրային լայնությունը մոտավորապես կազմում է 400 նմ (1200–1600 նմ), որը ընդգրկում է օպտիկական մանրաթելերի օգտագործելի ամբողջ տիրույթը: Լայնաշերտ բնութագրերը թույլ են տալիս հայտնաբերել երեք նոր երևույթներ. ա) լազերային մոդի երկուղորդված երևույթ կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարի թեք ալիքատարում, բ) օպտիկական փոխանջատման երևույթ օպտիկական հաղորդակցության տիրույթում կիրառվող մեկ կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարում, գ) առանձնացված սահմանափակված հետերոկառուցվածքային շերտի հաստության երևույթ:

NOVEL EFFECTS IN EXTREMELY BROADBAND SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIERS WITH NON-IDENTICAL QUANTUM WELLS

G.Sh. SHMAVONYAN

An extremely broad emission spectrum is obtained for semiconductor optical amplifiers with multiple quantum wells fabricated on substrate. The spectral width is nearly 400 nm (1200–1600 nm), which covers the entire usable bandwidth of an optical fiber. Broadband characteristics allow observing three novel effects: (i) bi-directional guided effect of lasing mode in a bending waveguide of the semiconductor optical amplifier, (ii) an optical switching effect in one semiconductor optical amplifier for optical communication band, and (iii) the effect of separate confinement heterostructure layer thickness.