

УДК 621.315.592

XXIII Международный симпозиум „Нанопизика и наноэлектроника“,
Нижний Новгород, 11–14 марта 2019 г.

Гетероструктуры с GaAs/GaP-квантовыми ямами, выращенные на Si-подложках

© Д.С. Абрамкин^{1,2}, М.О. Петрушков¹, М.А. Пуятто¹, Б.Р. Семягин¹, Е.А. Емельянов¹,
В.В. Преображенский¹, А.К. Гутаковский^{1,2}, Т.С. Шамирзаев^{1,2,3}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³ Уральский федеральный университет,
620002 Екатеринбург, Россия

E-mail: dalamber.07@mail.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены гибридные GaP/Si-подложки, позволяющие выращивать высокоэффективные светоизлучающие гетероструктуры с GaAs/GaP-квантовыми ямами. Несмотря на относительно высокую концентрацию центров безызлучательной рекомбинации в слоях GaP/Si, гетероструктуры с GaAs/GaP-квантовыми ямами, выращенные на гибридных GaP/Si подложках, не уступают в эффективности и температурной стабильности люминесценции аналогичным гетероструктурам, выращенным на согласованных GaP-подложках.

Ключевые слова: гибридные подложки, фотолюминесценция, GaP на Si, молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовые ямы.

DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48118.01

1. Введение

Интеграция высокоэффективных светоизлучающих приборов, созданных на основе $A^{III}B^V$ гетероструктур, с кремниевой технологией открывает перспективу значительного ускорения обработки информации за счет передачи данных по оптическому каналу как в пределах одного процессора, так и между различными устройствами [1,2]. Перспективным, с точки зрения интеграции в кремниевую технологию, материалом $A^{III}B^V$ является GaP, практически согласованный с Si по параметру решетки. Формирование гетероструктур на основе GaAs в широкозонной матрице GaP дает преимущества сильной локализации носителей заряда, которая обеспечивает высокую температурную стабильность, а также возможность варьирования рабочей длины волны излучения в широких пределах за счет эффектов размерного квантования [3,4].

В работе сообщается о получении GaAs/GaP-гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на гибридных подложках GaP/Si. Несмотря на высокую концентрацию центров безызлучательной рекомбинации в гибридных подложках GaP/Si, выращенные на их основе гетероструктуры с GaAs/GaP КЯ характеризуются высокой

эффективностью излучательной рекомбинации, сравнимой с эффективностью рекомбинации для подобных гетероструктур, выращенных на согласованных подложках GaP.

2. Формирование гетероструктур

Гетероструктуры GaAs/GaP/Si с КЯ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на модернизированной установке „Штат“.

На первом этапе выращивались гибридные подложки GaP/Si. В целях подавления формирования антифазных дефектов были использованы подложки Si ориентации (001), отклоненные на 6° в направлении [110] [5]. Окисный слой с поверхности Si удалялся при температуре 720°C (T_s) в потоке атомов кремния в течение 10 мин. Затем подложка отжигалась 30 мин в условиях сверхвысокого вакуума при температуре 800°C . Контроль за состоянием ростовой поверхности осуществлялся методом дифракции быстрых электронов на отражение. Рост начинался с формирования переходной области на кремниевой подложке посредством осаждения слоя GaP толщиной 6 монослоев (МС) при T_s 300°C в режиме атомно-слоевой эпитаксии, после чего T_s повышалась

до 380°C. Применение методики атомно-слоевой эпитаксии позволило добиться формирования сплошного когерентно-напряженного слоя GaP на начальных стадиях роста на Si и не допустить перехода в трехмерный режим роста GaP/Si [6–8]. Для роста следующего слоя в слабом потоке фосфора (отношение V/III < 1) высаживалось 4 МС атомов Ga, а затем поверхность выдерживалась в потоке фосфора в течение 20 с. Эта процедура повторялась 50 раз, пока общая толщина пленки не составила 55 нм. Затем T_s повышалась до 500°C, и в таком же режиме выращивался слой GaP толщиной 150 нм. Далее при одновременном осаждении материалов III и V групп с соотношением потоков V/III > 2, в режиме двумерно-слоевой эпитаксии со скоростью 1 МС/с выращивался 300 нм слой GaP.

На полученных таким образом гибридных подложках GaP/Si при $T_s = 500^\circ\text{C}$ были выращены структуры с КЯ GaAs/GaP. Квантовая яма формировалась путем осаждения GaAs в количестве, эквивалентном 3 МС. После формирования слой GaAs зарастивался слоем GaP толщиной 50 нм. Для сравнения, в аналогичных условиях были выращены слои GaP и гетероструктуры с GaAs/GaP КЯ на согласованных GaP-подложках ориентации (001).

Кристаллическое строение гетероструктур исследовано методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с помощью электронного микроскопа JEM-4000EX (400 кэВ). Стационарная фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась излучением GaN-лазерного диода с энергией кванта 3.06 эВ и плотностью мощности, варьируемой в диапазоне 2 мВт/см²–25 Вт/см², анализировалась с помощью спектрографа Acton Advanced SP2500A и измерялась ПЗС-камерой с азотным охлаждением. Измерения проводились в температурном диапазоне 5–200 К.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Просвечивающая электронная микроскопия

Изображение поперечного среза GaAs/GaP-гетероструктуры с КЯ, выращенной на Si-подложке, представлено на рис. 1. Как видно из рисунка, в слоях GaP/Si присутствуют прорастающие дислокации, характерное расстояние между которыми в приповерхностных областях составляет около 300 нм, что соответствует плотности $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$. Из ПЭМ-изображения высокого разрешения, представленного на вставке к рис. 1, видно, что GaAs/GaP КЯ характеризуется значительными флуктуациями толщины (0.9–1.8 нм).

3.2. Фотолюминесценция

Спектры стационарной ФЛ эпитаксиального слоя GaP, выращенного на согласованной GaP/GaP и гибридной GaP/Si подложках, измеренные при температуре 5 К и

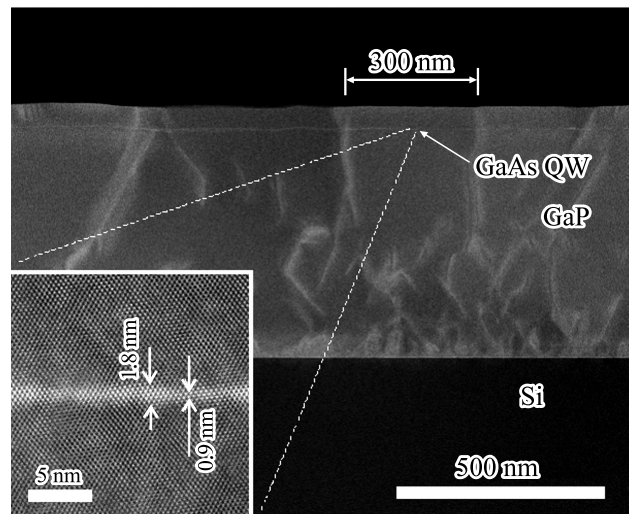


Рис. 1. ПЭМ-изображение поперечного среза GaAs/GaP/Si-гетероструктуры с КЯ. На вставке — ПЭМ-изображение участка КЯ, полученное в режиме высокого разрешения.

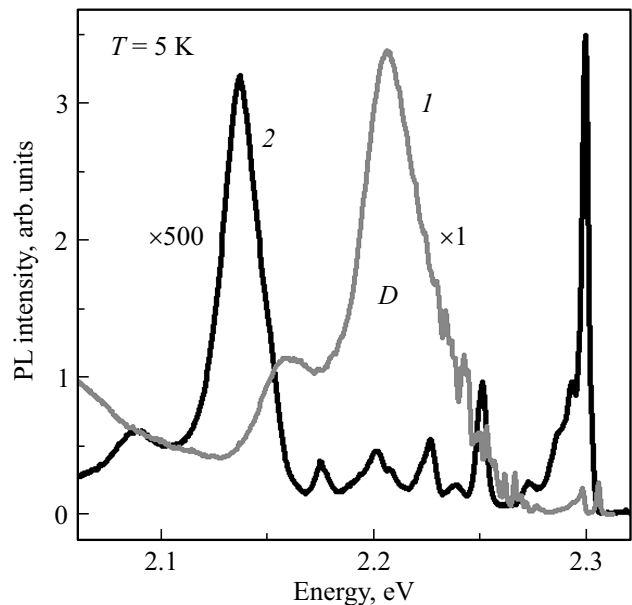


Рис. 2. Спектры стационарной ФЛ слоя GaP, выращенного на согласованной (1) GaP/GaP и гибридной (2) GaP/Si подложках, измеренные при плотности мощности возбуждения 25 Вт/см² и температуре 5 К.

плотности мощности возбуждения 25 Вт/см², представлены на рис. 2. В спектрах обеих структур доминирует полоса донорно-акцепторной рекомбинации (D) [9] и присутствуют полосы, обусловленные рекомбинацией экситонов, связанных на мелких примесях [9,10]. Из рисунка видно уменьшение интегральной интенсивности (в 500 раз) и сдвиг положения максимума полосы D в низкоэнергетическую область (на 70 мэВ) в спектре ФЛ гибридной подложки GaP/Si. Различия в спектральном

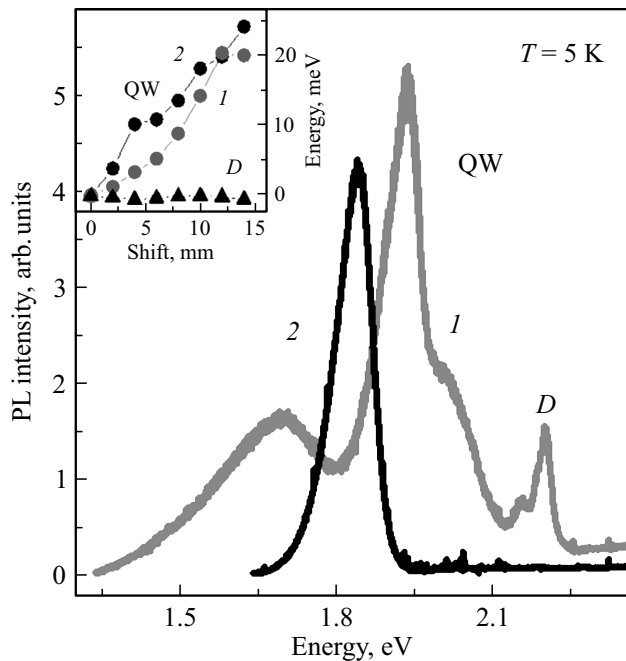


Рис. 3. Спектры стационарной ФЛ гетероструктур с GaAs/GaP КЯ, выращенных на (1) согласованной и (2) гибридной GaP/Si подложках, измеренные при плотности мощности возбуждения 2 мВт/см^2 и температуре 5 К. На вставке показано относительное смещение положения максимума полос D и QW в зависимости от смещения точки измерения спектра вдоль структур (1) GaAs/GaP и (2) GaAs/GaP/Si.

положении полос донорно-акцепторной рекомбинации связаны с отличиями в примесном составе слоев GaP, выращенных на различных подложках. Энергия максимума полосы D в обеих структурах пространственно однородна, т.е. не изменяется при измерении спектров ФЛ в различных точках по площади структур, как это показано на вставке к рис. 3.

Спектры ФЛ GaAs/GaP-гетероструктур с квантовыми ямами, выращенных на согласованной GaP и гибридной GaP/Si подложках, измеренные при температуре 5 К и плотности мощности возбуждения 2 мВт/см^2 , представлены на рис. 2. В спектрах доминируют полосы QW с максимумами на 1.935 и 1.839 эВ и полной шириной на половинной высоте (ПШПВ) 73 и 90 мэВ соответственно. Мы интерпретируем эти полосы как связанные с рекомбинацией носителей заряда в GaAs/GaP КЯ. Действительно, как видно из вставки к рис. 2, энергия максимумов этих полос монотонно увеличивается на $\sim 20 \text{ мэВ}$ при смещении точки измерения спектра ФЛ на 15 мм вдоль поверхности структуры. Спектральное смещение полос QW обусловлено неоднородностью потока атомов Ga, приводящего к градиенту толщины GaAs/GaP КЯ по площади гетероструктуры. Необходимо отметить, что, несмотря на низкую эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в гибридной GaP/Si-подложке, свидетельствующей о высокой концентрации

центров безызлучательной рекомбинации, интегральная интенсивность ФЛ выращенной на таких подложках GaAs/GaP КЯ слабо отличается от интенсивности ФЛ такой же структуры, выращенной на согласованной GaP-подложке.

Температурные зависимости интегральной интенсивности полосы QW, нормированные на интегральную интенсивность ФЛ при 5 К, для КЯ, выращенных на согласованной и гибридной GaP/Si-подложках, представлены на рис. 4. Обе зависимости практически идентичны, а гашение ФЛ описывается энергией активации $E_a = 43 \pm 7 \text{ мэВ}$.

В заключение раздела мы хотим еще раз заострить внимание на наиболее важных экспериментальных результатах.

(1) Слои GaP/Si характеризуются плотностью дислокаций $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$. Толщина GaAs/GaP/Si КЯ флуктуирует в пределах 0.9–1.8 нм.

(2) В спектрах ФЛ слоев GaP/GaP и гибридных гетероструктур GaP/Si доминируют полосы, связанные с межпримесными переходами.

(3) Интегральная интенсивность ФЛ эпитаксиального слоя GaP выращенного на кремниевой подложке, в ~ 500 раз ниже слоя GaP, выращенного на согласованной GaP-подложке.

(4) Интегральные интенсивности ФЛ GaAs/GaP КЯ, выращенных на согласованной GaP и гибридной GaP/Si подложках, практически одинаковы и характеризуются идентичными температурными зависимостями с энергией активации гашения ФЛ $E_a = 43 \pm 7 \text{ мэВ}$.

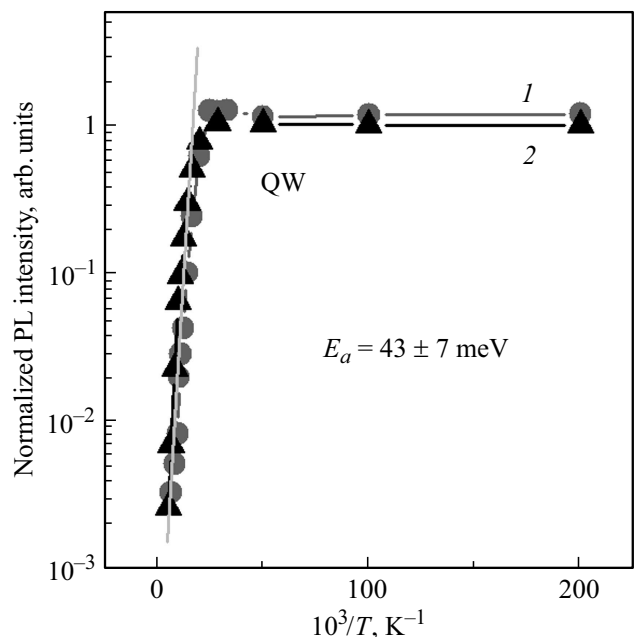


Рис. 4. Температурные зависимости интегральной интенсивности полосы QW, нормированные на интегральную интенсивность ФЛ при 5 К, для структур с GaAs/GaP КЯ, выращенных на (1) согласованной и (2) гибридной GaP/Si подложках. Измерения проведены при $P_{\text{ex}} = 25 \text{ Вт/см}^2$.

4. Обсуждение результатов

Одним из наиболее существенных различий в ФЛ свойствах эпитаксиального слоя GaP, выращенного на подложках GaP и Si, является уменьшение интенсивности излучения в гибридной структуре GaP/Si почти на 3 порядка величины. Это свидетельствует о том, что при ее формировании в слое GaP образуется высокая концентрация точечных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации. Сравнение параметров полученных в настоящей работе гибридных подложек GaP/Si и ранее полученных нами гибридных подложек GaAs/Si показывает, что, несмотря на заметно большее рассогласование параметров решетки кремния и GaAs, подложки GaAs/Si содержат заметно меньшую концентрацию точечных дефектов, о чем свидетельствует их интенсивная ФЛ, сравнимая с интенсивностью ФЛ эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных на согласованных GaAs-подложках [11]. Мы полагаем, что введение дислокаций, сопровождаемое появлением точечных дефектов в их окрестности, в слой GaP, согласованный по постоянным решетки с Si-подложкой в процессе высокотемпературной гетероэпитаксии, может происходить при остывании гибридной гетероструктуры GaP/Si за счет появления механических напряжений из-за разности коэффициентов температурного расширения GaP и Si [12,13]. Для компенсации негативного влияния механических напряжений мы планируем в дальнейшем введение в буферный слой GaP/Si сверхрешеток GaP/AlP.

Тем не менее, поскольку интегральная интенсивность ФЛ GaAs/GaP КЯ, выращенных на гибридных и согласованных подложках, практически одинакова во всем диапазоне температур измерения, можно утверждать, что повышенная концентрация центров безызлучательной рекомбинации в гибридных GaP/Si-подложках, не оказывает заметного негативного влияния на эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в КЯ.

Это тем более удивительно в сравнении с ранее полученными результатами для InAs/AlAs/GaAs/Si-гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками (КТ) [14]. Несмотря на то что гибридные подложки GaAs/Si демонстрируют интенсивную ФЛ, сравнимую с ФЛ GaAs/GaAs-слоев даже при 300 К, InAs/AlAs-гетероструктуры, выращенные на этих подложках, характеризуются весьма низкой эффективностью ФЛ. Падение эффективности ФЛ в структурах InAs/AlAs/GaAs/Si обусловлено, как показано в нашей недавней работе [14], захватом носителей заряда из InAs КЯ и КТ на центры безызлучательной рекомбинации в слоях AlAs.

Мы полагаем, что высокая интенсивность ФЛ GaAs/GaP/Si КЯ, сравнимая с GaAs/GaP/GaP КЯ, обусловлена тем, что большая часть фотовозбужденных в GaP носителей заряда захватывается в КЯ, а не на центры безызлучательной рекомбинации. Это связано с

низкой долей площади гетероструктуры, с которой носители заряда захватываются на центры безызлучательной рекомбинации, сконцентрированные в окрестностях прорастающих дислокаций. Захваченные в КЯ носители заряда локализируются на неоднородностях размера и состава КЯ [15], что предотвращает их транспорт к центрам безызлучательной рекомбинации. Аналогичный положительный эффект влияния локализации носителей на эффективность люминесценции наблюдается в III–N светоизлучающих гетероструктурах [16], а также в InAs/AlAs-гетероструктурах с КЯ и КТ [17].

Проведенные нами расчеты [18] показывают, что энергия локализации электронов в GaAs/GaP КЯ значительно меньше, чем энергия локализации дырок. Это позволяет предполагать, что температурное гашение ФЛ КЯ идет за счет делокализации электронов. Действительно, наши экспериментальные данные показывают, что энергия активации температурного гашения ФЛ КЯ составляет 43 ± 7 мэВ для КЯ, выращенных на обоих типах подложек, и не зависит от положения максимума полосы ФЛ КЯ, равных 1.935 и 1.839 эВ для GaAs/GaP/GaP и GaAs/GaP/Si КЯ соответственно.

5. Заключение

Таким образом, в работе отработана технология получения гибридных подложек GaP/Si. Показано, что, несмотря на относительно высокую концентрацию дефектов — центров безызлучательной рекомбинации в слоях GaP/Si, формируемые на этих гибридных подложках светоизлучающие гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/GaP/Si не уступают по эффективности и температурной стабильности люминесценции аналогичным гетероструктурам, выращенным на согласованных GaP-подложках.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда, проект № 17-72-10038.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Asghari, A.V. Krishnamoorth. Nature Photonics, **5**, 268 (2011).
- [2] A. Rickman. Nature Photonics, **8**, 579 (2014).
- [3] T.S. Shamirzaev, D.S. Abramkin, A.K. Gutakovskii, M.A. Pulyato. Appl. Phys. Lett., **97**, 023108 (2010).
- [4] P. Castrillo, G. Armelles, J.P. Silveira, F. Briones, J. Barbolla. Appl. Phys. Lett., **71**, 1353 (1997).
- [5] Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков. УФН, **178**, 459 (2008).
- [6] М.А. Путьято, Ю.Б. Болховитянов, А.П. Василенко, А.К. Гутаковский. ФТП, **43**, 1275 (2009).

- [7] T.J. Grassman, M.R. Brenner, S. Rajagopalan, R. Unocic, R. Dehoff, M. Mills, H. Fraser, S.A. Ringel. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 232106 (2009).
- [8] K. Yamane, T. Kawai, Y. Furukawa, H. Okada, A. Wakahara. *J. Cryst. Growth*, **312**, 2179 (2010).
- [9] A.T. Vink, A.J. Bosman, J.A. van der Does de Bye, R.C. Peters. *Sol. St. Commun.*, **7**, 1475 (1969).
- [10] Е.Ф. Гросс, Д.С. Недзвецкий. *ДАН СССР*, **152**, 309 (1963).
- [11] Д.С. Абрамкин, М.О. Петрушков, Е.А. Емельянов, М.А. Пулято, Б.Р. Семягин, А.В. Васев, М.Ю. Есин, И.Д. Лошкарев, А.К. Гутаковский, В.В. Преображенский, Т.С. Шамирзаев. *Автометрия*, **54** (2), 85 (2018).
- [12] Y. Okada, Y. Tokumaru. *J. Appl. Phys.*, **56**, 314 (1984).
- [13] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
- [14] Д.С. Абрамкин, М.О. Петрушков, М.А. Пулято, Б.Р. Семягин, Т.С. Шамирзаев. *ФТП*, **52**, 1373 (2018).
- [15] D.S. Abramkin, A.K. Gutakovskii, T.S. Shamirzaev. *J. Appl. Phys.*, **123**, 115701 (2018).
- [16] F.A. Ponce, D.P. Bour. *Nature*, **386**, 351 (1997).
- [17] T.S. Shamirzaev, D.S. Abramkin, A.V. Nenashev, K.S. Zhuravlev, F. Trojaneck, B. Dzumvak, P. Maly. *Nanotechnology*, **21**, 155703 (2010).
- [18] D.S. Abramkin, M.A. Putyato, S.A. Budennyu, A.K. Gutakovskii, B.R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii, O.F. Kolomys, V.V. Strelchuk, T.S. Shamirzaev. *J. Appl. Phys.*, **112**, 083713 (2012).

Редактор Г.А. Оганесян

Heterostructures with GaAs/GaP quantum wells grown on Si substrates

D.S. Abramkin^{1,2}, M.O. Petrushkov¹, M.A. Putyato¹,
B.R. Semyagin¹, E.A. Emelyanov¹,
V.V. Preobrazhenskii¹, T.S. Shamirzaev^{1,2,3}

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

³ Ural Federal University,
620002 Yekaterinburg, Russia

Abstract Molecular beam epitaxy growth of GaP/Si heterostructures that suitable for formation of high efficiency light emitting heterostructures with GaAs/GaP quantum wells (QWs) is discussed. In despite of relatively high irradiative centers concentration in GaP/Si films, heterostructures with GaAs/GaP QWs grown on hybrid GaP/Si substrates yields to similar heterostructures grown on matched GaP substrates in efficiency and temperature stability of luminescence.