

Фотоэлектрические характеристики структур с квантовыми ямами, чувствительных в диапазоне 3—5 мкм, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии

Л. М. Василевская, Ю. А. Кузнецов, В. Б. Куликов, А. И. Хатунцев
ГУП «НПП "Пульсар"», Москва, Россия

И. В. Будкин, П. В. Булаев, И. Д. Залевский, А. А. Мармалюк, Д. Б. Никитин,
А. А. Падалица, А. В. Петровский
АО "Сигм-Плюс", Москва, Россия

Методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении были выращены полупроводниковые гетероструктуры (ГС) с множественными квантовыми ямами (МКЯ) для многоэлементных фотоприемников (ФП), работающих в спектральном диапазоне 3—5 мкм, на основе системы InGaAs/AlGaAs. Условия роста были оптимизированы для получения ГС повышенной однородности, пригодных для изготовления матричных ФП. Температура роста составила 750 °С, давление 60 мм рт. ст. Изготовленные тестовые ФП продемонстрировали обнаружительную способность $D^ = 5,65 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ в максимуме спектральной чувствительности на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 5,2 \text{ мкм}$ при температуре 77 К. Полученные результаты показывают потенциальную возможность использования гетероструктур на основе InGaAs/AlGaAs для изготовления матриц, фоточувствительных в области 3—5 мкм, с большим количеством элементов. Предложены пути дальнейшего улучшения параметров ФП.*

Инфракрасные фотоприемники с максимумом спектральной чувствительности в области 3—5 и 8—12 мкм (в так называемых окнах прозрачности атмосферы) широко используются в различных областях, таких как медицина, системы охраны, ночного наблюдения и навигации и т. д.

Наиболее перспективными для данных задач являются ФП на основе многослойных ГС с МКЯ [1]. Их использование позволяет создавать фотоприемные устройства с большим количеством элементов (более 10^6) и тепловизионные камеры. Наибольшее распространение получили ГС на основе соединений A^3B^5 , в частности AlGaAs/GaAs. Изготовление фоточувствительных элементов на диапазон 8—12 мкм с использованием данной системы хорошо отработано, в то время как с диапазоном 3—5 мкм возникают трудности, связанные с необходимостью создания барьерных слоев AlGaAs с высоким содержанием AlAs, так как при таких составах AlGaAs становится непрямозонным материалом, что значительно ухудшает свойства ФП [1]. Для указанного спектрального диапазона наибольшее распространение получила система InGaAs/AlGaAs [2—4].

Использование InGaAs в качестве материала квантовой ямы (КЯ) взамен GaAs ведет к понижению энергетического уровня в КЯ, что позво-

ляет добиться необходимого межуровневого зазора без значительного увеличения содержания AlAs в барьере AlGaAs.

На текущий момент основным методом получения ГС—МКЯ, содержащих InGaAs, является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [2—4]. МЛЭ отличает высокая степень контроля и управления процессом роста, возможность получения сверхтонких слоев с атомнорезкими гетерограницами. С другой стороны, МЛЭ присущи и некоторые недостатки, такие как низкая скорость роста, небольшая площадь загрузки, высокая стоимость оборудования, что в конечном итоге приводит к малой производительности и высокой себестоимости ГС—МКЯ [5]. Поэтому при переходе к полупромышленному и промышленному производствам закономерной является попытка изготовления ГС—МКЯ на основе системы InGaAs/AlGaAs методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении (МОСГЭ). С помощью МОСГЭ возможно при достаточно высоком структурном совершенстве и хорошей однородности ускорить процесс роста и одновременно обрабатывать большое количество подложек значительной площади, что позволит понизить себестоимость получаемых ГС—МКЯ. Современное оборудование МОСГЭ способно обеспечить воспроизводимое наращивание сверх-

однородных многослойных ГС с прецизионным контролем толщины, состава и уровня легирования слоев с хорошей резкостью гетерограниц [6].

В данной работе предпринята попытка создания ГС—МКЯ на основе системы InGaAs/AlGaAs для ФП, работающих в спектральном диапазоне 3—5 мкм, методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении.

Эксперимент

ГС—МКЯ InGaAs/AlGaAs выращивали методом МОС-гидридной эпитаксии на установке "Сигмос-130" с горизонтальным прямоугольным кварцевым реактором. Вращение подложкодержателя, необходимое для обеспечения повышенной однородности структур, осуществлялось с помощью потока газа-носителя. Температура роста структур достигла 750 °С. Типичное рабочее давление в камере реактора составляло 60—70 мм рт. ст.

В качестве источника элементов третьей группы использовались триэтилгаллий (TEGa) [(C₂H₅)₃Ga], триметилалюминий (TMAI) [(CH₃)₃Al] и триметилиндий (TMIIn) [(CH₃)₃In]. Источником элементов пятой группы был 100%-й арсин (AsH₃). Смесь силана (SiH₄) с водородом в соотношении 1:20 использовалась в качестве лигатуры *n*-типа. Арсин перед подачей в газовую систему проходил двухступенчатую очистку продувкой через цеолит и суперочиститель "Сигма-ХИМ-1.0". Это позволило снизить содержание кислорода и воды в арсине до значений не более 0,1 прм. В качестве газа-носителя использовался водород, очищенный методом диффузии через нагретый до 450 °С палладиевый фильтр, до точки росы не выше — 110 °С.

Выращивание производилось на подложках полуизолирующего GaAs диаметром 40 и 51 мм марки АГЧП-8, ориентированных по плоскости (100) и имеющих небольшую разориентацию на 1—2° по направлению [110]. Подложки были готовы к эпитаксии ("epi-ready"), поэтому предварительная обработка подложек перед процессом роста не проводилась.

ГС—МКЯ состояла из верхнего и нижнего контактов *n*⁺-GaAs, между которыми выращивались 30 периодов сверхрешетки InGaAs/AlGaAs. Контакты легировались до уровня *n* = 1·10¹⁸ см⁻³. Толщина верхнего контакта составляла 0,5 мкм, а нижнего — 1 мкм. Толщина нелегированного барьера Al_{0,3}Ga_{0,7}As поддерживалась равной 40 нм. Толщина КЯ фиксировалась на уровне 4 нм In_{*x*}Ga_{1-*x*}As, а мольная доля InAs варьировалась для получения чувствительности в более коротковолновой, чем 8—12 мкм, области спектра.

Профиль легирования, толщины и составы слоев определялись с помощью Оже-спектрометра РН1-560, СВ-профилометра Polaron 4200 и рентгеновского дифрактометра "Дрон 3".

Из выращенных структур были изготовлены тестовые ФП (400×400 мкм). Элементы формировались травлением через сверхрешетку до нижнего *n*⁺-GaAs контакта. Омические контакты формировались термическим напылением слоев Au-Ge (Ge — 12 %) и Au с последующим вжиганием в атмосфере азота при температуре 450 °С, магнетронным напылением Ti и термическим напылением Al.

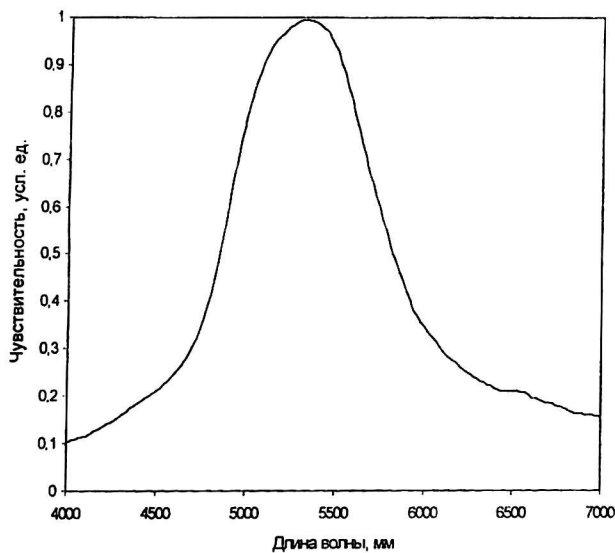
Тестовые ФП были исследованы с помощью спектрального измерительного комплекса на базе монохроматора МДР-41 и установки ИМИ-1.

Результаты

Выращен ряд ГС с толщинами КЯ и барьеров 4 и 40 нм, соответственно. Состав барьера AlGaAs оставался неизменным и составлял 30 % AlAs, в то время состав КЯ варьировался в диапазоне 0—25 % InAs. Изготовленные тестовые ФП показали, что по мере увеличения содержания In в КЯ максимум спектральной чувствительности систематически смещается с 8 до 5,2 мкм при данных условиях эпитаксиального роста. Характеристики самого коротковолнового образца представлены в таблице и на рисунке.

Основные параметры коротковолнового образца

| λ_{max} , мкм | $\Delta\lambda_{1/2}$, мкм | $T_{\text{изм}}$, К | $D^*\lambda_{\text{max}}$, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹ |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| 5,2 | 1,0 | 77,7 | 5,16·10 ⁹ |



Спектр фоточувствительности тестового ФП

Дальнейшее увеличение содержания In в КЯ приводило к значительному повышению плотности дефектов, что недопустимо для данного вида ФП. Причиной этого, по всей видимости, является переход от двумерного механизма роста к трехмерному из-за накопления напряжений в ГС—МКЯ, при выбранных режимах роста, что ведет к образованию дефектных областей.

Структуры проходили постростовой анализ, при котором определялись толщины, составы и уровень легирования эпитаксиальных слоев. Эта методика включала в себя рентгеновскую дифрактометрию, Оже-спектроскопию, измерения фотовольтаического спектра, С—V-профиля и спектра фотолюминесценции. Использование этой методики позволяло с высокой точностью определять параметры ГС. В процессе получения ГС—МКЯ были оптимизированы скорость вращения подложкодержателя, скорость парогазовой смеси, скорость роста, коммутация газовых потоков в целях повышения однородности на подложках диаметром 51 мм с резкими гетерограницами. Проведенный комплекс мероприятий привел к разбросу параметров тестовых ФП по пластине, не превышающему 2 %, что открывает широкие перспективы к созданию многоэлементных полупроводниковых ФП, качество которых во многом зависит от однородности параметров от одного элемента к другому.

Полученные результаты не являются оптимальными, поэтому для улучшения характеристик необходимо:

сдвинуть максимум спектральной чувствительности в область 3—5 мкм, для чего необходимо увеличить глубину квантовой ямы. Это возможно сделать двумя способами: увеличивая содержание AlAs в барьере AlGaAs или InAs — в квантовой яме InGaAs. Факторами, ограничивающими увеличение AlAs, являются смена собственной проводимости AlGaAs с *n*-типа на *p*-тип в выбранном диапазоне технологических параметров роста и изменение прямого характера зонных переходов на непрямой. В то же время с увеличением содержания InAs при заданной толщине КЯ может происходить переход от двумерного роста к трехмерному, а также возможно образование дислокаций несоответствия

при превышении критических условий. Все это значительно ухудшает характеристики ФП;

увеличить обнаружительную способность, что возможно осуществить за счет увеличения тока сигнала, который зависит от подвижности электронов в барьерных слоях. Улучшение подвижности электронов в AlGaAs связано с улучшением качества материала. Так как AlGaAs обладает высоким сродством с кислородом, то это приводит к образованию глубоких уровней, которые ухудшают транспорт фотовозбужденных носителей через сверхрешетку.

Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении были выращены ГС—МКЯ InGaAs/AlGaAs с различным содержанием In в КЯ. Условия роста были оптимизированы для получения повышенной однородности и приемлемого качества материала. Наиболее коротковолновый тестовый ФП на основе ГС продемонстрировал обнаружительную способность $D^* = 5,65 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ в максимуме спектральной чувствительности на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 5,2 \text{ мкм}$ при температуре 77 К. Предложены пути дальнейшего улучшения параметров ФП. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность создания на основе InGaAs/AlGaAs широкоформатных матриц, фоточувствительных в области 3—5 мкм с большим количеством элементов.

Литература

1. *Levine B. F.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. № 8. P. 1—76.
2. *Shakuda Y. et al.* // Ibid. 1990. V. 29. № 4. P. 552—555.
3. *Tidrow M. Z. et al.* // SPIE. 1997. V. 3061. P. 772—780.
4. *Bois Ph. et al.* // Ibid. P. 765—771.
5. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры: Пер. с англ./Под ред. Л. Ченга, К. Плога. — М.: Мир, 1989. — 584 с.
6. *Залевский И. Д.* и др. // Изв. вузов. Сер. Материалы электронной техники. 1999. № 3. С. 8—11.

The photoelectric performances of quantum well structures brought up by a method of the OMC-hydride epitaxy and sensitive in the 3—5 μm range

L. M. Vasilevskaya, Yu. A. Kuznetsov, V. B. Kulikov, A. I. Khatuntsev
PULSAR Scientific & Production Enterprise, Moscow, Russia

I. V. Budkin, P. V. Bulaev, I. D. Zalevsky, A. A. Marmalyuk,
D. B. Nikitin, A. A. Padalitsa, A. V. Petrovsky
SIGM-PLUS, Inc., Moscow, Russia

On the basis of InGaAs/AlGaAs system the semiconductor heterostructures with multiple quantum wells for multiple 3—5 μm photodetectors were brought up by the method of the OMC-hydride epitaxy at underpressure. The requirements of increase were optimized for deriving the heterostructures of heightened homogeneity, which are suitable for manufacture of the array PD's. The temperature of increase was 750 °C, the pressure was 60 mm of the Hg high. The manufactured test PD's have demonstrated a detectivity of $D^ = 5.65 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ in a maximum of spectral responsivity ($\lambda_{\text{max}} = 5.2 \mu\text{m}$, $T = 77 \text{ K}$). The obtained results display a potential of usage of such heterostructures for manufacture of arrays with the great many of elements photosensing in 3—5 μm range. The ways of further improving the PD parameters are offered.*