

Л. Л. ТЕРЛЕЦКАЯ, к. ф.-м. н. Л. Ф. КАЛИНИЧЕНКО,
к. ф.-м. н. В. В. ГОЛУБЦОВ

Украина, Одесский нац. университет им. И. И. Мечникова,
Одесская нац. морская академия
E-mail: oguint@paco.net

Дата поступления в редакцию
20.12.2002 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА "КРЕМНИЙ—АРСЕНИД ГАЛЛИЯ" ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПТРОНОВ

Проведен сравнительный анализ люминесцентных и фотоэлектрических характеристик структур $p^+-Si-n-Si-p-Si-n^+-GaAs$. Показана перспективность гетероструктур для создания интегрального оптрона.

Изучение структур на основе гетероперехода Si—GaAs представляет научный и практический интерес прежде всего в связи с возможностью создания на их основе интегральных оптоэлектронных устройств (излучателя на основе GaAs и фотоприемника на основе Si в единой структуре) [1, 2]. Относительная легкость выращивания арсенида галлия на пластинах кремния большого диаметра позволяет комбинировать схемы на основе этих полупроводниковых материалов. Тот факт, что кремний намного дешевле подложечного арсенида галлия, а его механическая прочность и теплопроводность выше, чем у GaAs, стимулирует интерес к разработке новых и совершенствованию существующих технологических методов выращивания гетероструктур Si—GaAs, исследованию основных особенностей их физических свойств [3].

В данной работе проведено исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) гетероэпитаксиальных слоев GaAs и распределение спектральной чувствительности в структурах $p^+-Si-n-Si-p-Si-n^+-GaAs$, полученных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) с целью изучения возможности создания на их основе интегральных оптронов.

Для создания структур использовались пластины кремния n -типа проводимости с удельным сопротивлением 150 Ом·см и ориентацией (100). Общий вид структуры в разрезе представлен на рис. 1. С одной стороны пластины толщиной 250 мкм методом диффузии создавался гомопереход $n-Si-p-Si$ на глубине 50 мкм. На противоположной стороне подложки методом ЖФЭ из четырехкомпонентного раствора Pb(Sn)—Si—Ga—As в расплаве выращивался слой $n-GaAs$ [3, 4]. Толщина выращенных гетероэпитаксиальных слоев GaAs составляла 8—20 мкм. По данным рент-

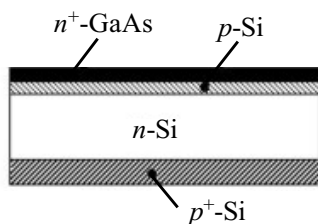


Рис. 1. Структура $p^+-Si-n-Si-p-Si-n^+-GaAs$

геноструктурных исследований, полученные слои были монокристаллическими. В процессе эпитаксии формировался дополнительный переход в кремнии на глубине 12—15 мкм. Концентрация электронов в слоях $n-GaAs$ составляла 10^{17} — 10^{19} см⁻³ (300 К).

Кремний являлся как амфотерной, так и основной примесью в полученных $n-GaAs$ -слоях, что позволяло без специального легирования получать многослойные структуры с гомо- и гетеропереходами.

Спектры ФЛ гетероэпитаксиальных слоев GaAs измерялись на установке, созданной на базе спектрометра ИСП-51, при температурах 77—300 К. Возбуждение спектров осуществлялось излучением He—Ne-лазера. Для регистрации сигнала использовался германиевый фотодиод с системой синхронного детектирования. Спектры ФЛ всех исследованных образцов были качественно подобны. На рис. 2 представлены характерные спектры ФЛ эпитаксиальных слоев $n-GaAs$, выращенных на кремниевых подложках ориентацией (100).

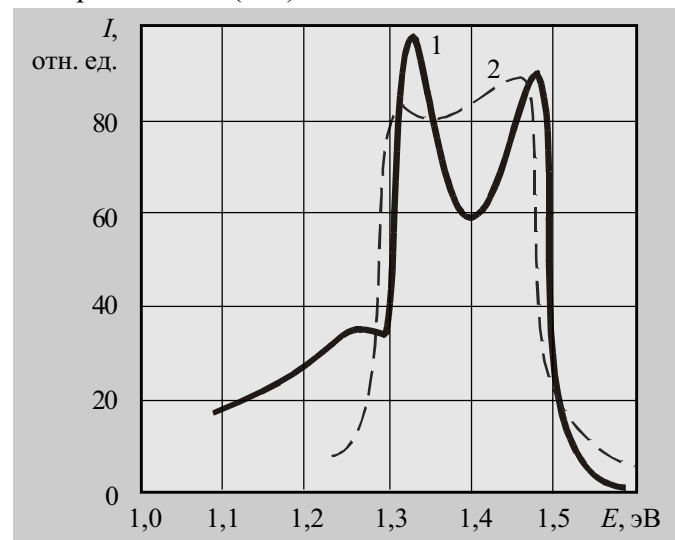


Рис. 2. Спектры ФЛ эпитаксиальных слоев $n-GaAs$, выращенных на Si-подложках ориентацией (100):
1 — 77 К; 2 — 300 К

Анализ спектров образцов показал, что максимумы всех полос спектров ФЛ $n-GaAs$ смещены в длинноволновую область относительно их положения в монокристаллах. Сдвиг полос объясняется наличием в гетероэпитаксиальном слое напряжений, обусловленных значительным рассогласованием параметров

кристаллических решеток Si и GaAs. Интенсивность краевой полосы ФЛ выращенных слоев выше по сравнению с неэпитаксиальным материалом, что связано с положительными особенностями технологического процесса ЖФЭ (низкая температура, невысокая скорость роста) [5]. Появление в спектре ФЛ линий с максимумом при 1,48 эВ связано с мелким акцептором Si.

Впервые в спектрах ФЛ гетероэпитаксиального GaAs были обнаружены дополнительные максимумы, соответствующие 1,27 и 1,32 эВ. Наличие этих максимумов обусловлено дефектами на границе раздела гетероперехода Si—GaAs [2].

Следует отметить, что в случае слабодопированных гетероэпитаксиальных слоев n -GaAs ($n=10^{17}$ см⁻³) в спектрах ФЛ наблюдалась только одна полоса с энергией максимума 1,42 эВ, которая характерна для слоев арсенида галлия, выращиваемых методом ЖФЭ. Появление этой полосы обусловлено специфическими собственными структурными дефектами, образующимися при выращивании из растворов-расплавов при низких температурах. В данном случае излучательная рекомбинация через собственные структурные дефекты является дополнительным проявлением рассогласования параметров решеток GaAs и Si.

Исследованы температурные зависимости энергии максимума E (1) и полуширины δ (2) спектров ФЛ гетероэпитаксиальных слоев n -GaAs (рис. 3). На кривой 1 наблюдается возрастание энергии максимума ФЛ в интервале температур 77—230 К и уменьшение при $T>230$ К. Полуширина спектров увеличивалась до 200 К с последующим ее снижением в области более высоких температур.

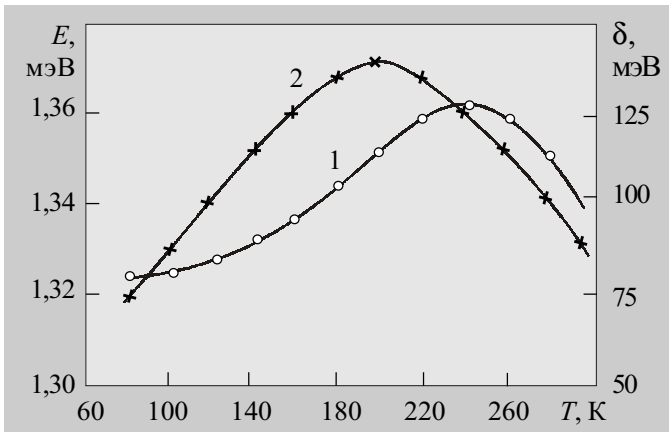


Рис. 3. Зависимость энергии максимума E (1) и полуширины δ (2) спектров ФЛ гетероэпитаксиальных слоев n -GaAs от температуры

Таким образом, анализ спектров ФЛ слоев n -GaAs, выращенных на Si-подложках, показал, что, как и для гомоэпитаксиальных слоев, основной особенностью гетероэпитаксиального арсенида галлия является большая по сравнению с неэпитаксиальным GaAs интенсивность краевой полосы излучения. Этот факт подтверждает возможность создания на основе гетероэпитаксиального GaAs эффективных источников излучения для использования их в качестве одного из элементов интегрального оптрона.

Проведено исследование спектральных характеристик описанных выше фототиристорных структур p^+ -Si— n -Si— p -Si— n^+ -GaAs с целью выяснения возможности использования их в качестве второго элемента оптопары — фотоприемника. Спектральное распределение fotocувствительности образцов измерялось с помощью монохроматора ДМР-4 при освещенностях, обеспечивающих линейность люкс-амперной характеристики. Измерения проводились в фотогальваническом и фотодиодном режимах до переключения четырехслойной структуры в проводящее состояние. Образцы освещались со стороны слоя n -GaAs.

Типичные спектры fotocувствительности четырехслойных гетероструктур, измеренные при 300 К, представлены на рис. 4 (при понижении температуры до 193 К характер спектров не изменялся, наблюдался лишь сдвиг в сторону больших энергий фотонов). Кривые, приведенные к равному уровню падающей энергии, подтверждают наличие гетероперехода в структуре. Максимум спектральной чувствительности у различных образцов наблюдался в области энергий 1,38—1,29 эВ, т. е. спектральная чувствительность структур объясняется, в основном, процессами поглощения в кремнии. Эпитаксиальный слой n -GaAs в данном случае играет роль "оптического окна" по отношению к нижележащему слою кремния.

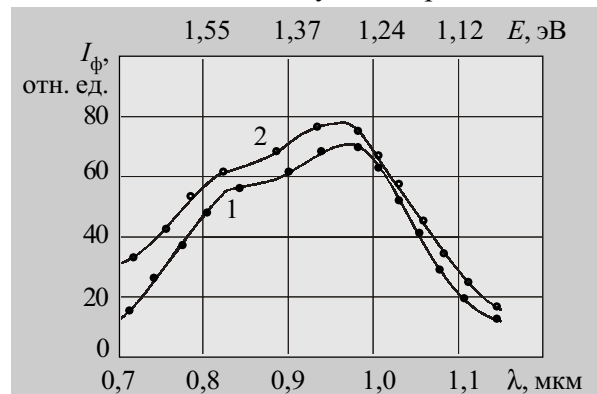


Рис. 4. Спектральные характеристики структуры p^+ -Si— n -Si— p -Si— n^+ -GaAs:

1 — в фотогальваническом режиме; 2 — в режиме фотодиода

В спектрах обнаружен небольшой максимум чувствительности в области энергий 1,51 эВ, соответствующий краю собственного поглощения арсенида галлия. Такая форма коротковолновой границы поглощения связана с существенной неоднородностью по толщине эпитаксиального слоя, обусловленной технологическими сложностями. Поэтому появление второго максимума, по-видимому, связано с поглощением света на участках образца с толщиной слоя n -GaAs, равной 1—2 мкм. Наблюдаемый резкий спад fotocувствительности в коротковолновой области обусловлен рекомбинацией неосновных носителей, вызванной наличием дефектов на границе раздела гетероперехода, а также спектральной зависимостью коэффициента поглощения для кремния и арсенида галлия. В фотодиодном режиме имеет место сдвиг коротковолновой границы спектральной чувствительности в сторону коротких волн. Это явление связано,

по-видимому, с возникновением на границах раздела слоев структуры под воздействием внешнего смещения электрических полей, приводящих к образованию дополнительных неосновных носителей тока, которые вносят дополнительный вклад в величину фототока.

Наблюдалось смещение максимума спектральной чувствительности $p-n-p-n$ -структур с различной зависимостью напряжения включения ($U_{\text{вкл}}$) от величины светового потока (Φ), глубины залегания коллекторного перехода и температуры. Это явление с привлечением соответствующих механизмов обсуждалось в ранее опубликованных работах [6, 7]. Сдвиг максимума чувствительности в коротковолновую область наблюдался у образцов с меньшей зависимостью $U_{\text{вкл}}=f(\Phi)$, что обусловлено легированием поверхностного слоя кремния компонентами другого материала. Аналогичная зависимость наблюдалась и при более глубоком расположении коллекторного перехода [6].

Характерное спектральное распределение квантовой эффективности фототиристорных структур, исследованное при температурах 193—353 К, представлено на рис. 5. На всех кривых выделяются два ярко выраженных максимума, соответствующих энергиям 1,55 и 1,17 эВ (300 К). Оба максимума соответствуют энергиям фотонов, при которых в GaAs и Si в результате поглощения квантов света образуются электронно-дырочные пары.

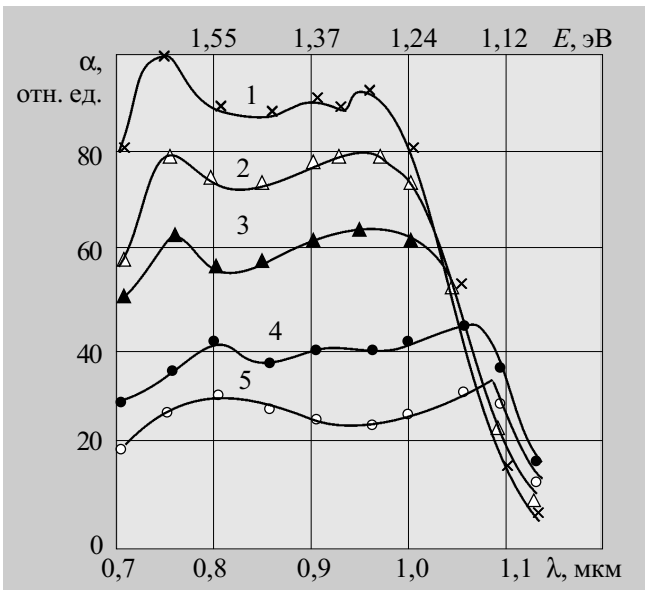


Рис. 5. Спектральное распределение квантовой эффективности $p-n-p-n$ -структуры при различных температурах:

1 — 193 К; 2 — 253 К; 3 — 273 К

При понижении температуры до 193 К максимумы чувствительности смещаются в область больших энергий, т. е. до 1,67 и 1,30 эВ, соответственно. Повышение температуры способствует сдвигу максимума в область меньших энергий (1,51 и 1,159 эВ, соответственно). Такое смещение максимумов чув-

ствительности при различных температурах обусловлено, по-видимому, изменением ширины запрещенной зоны полупроводников [6]. Резкий спад чувствительности при высоких температурах связан с увеличением скорости рекомбинации неосновных носителей. Появляющийся при некоторых температурах третий максимум при 1,37 эВ (рис. 5, кривые 1, 4) предположительно имеет примесный характер. Увеличение спектрального ответа и более ярко выраженное проявление максимумов чувствительности при низких температурах связано с уменьшением тепловых колебаний кристаллической решетки и с соответствующим уменьшением тепловых шумов и рассеяния носителей.

Квантовая эффективность, выраженная в абсолютных единицах, для того же образца составляла 0,4 эл/фот (300 К) в области энергий, соответствующих собственному поглощению кремния.

Пороговая и интегральная чувствительность фототиристорных структур, несмотря на большое расхождение в параметрах кристаллических решеток Si и GaAs, на рабочей длине волны составляла соответственно $(0,2 \dots 0,8) \cdot 10^{-9}$ Вт и 1—2 А/лм.

Таким образом, анализ результатов исследования показал практически полное совпадение максимума спектральной чувствительности фототиристора с максимумом спектра фотолуминесценции гетероэпитаксиальных слоев n -GaAs. Этот факт, в сочетании с высокими энергетическими параметрами излучателя и фотоприемника, подтверждает возможность создания на основе структур $p^+-Si-n-Si-p-Si-n^+-GaAs$ интегрального оптрона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дорджин Г. Г., Садофьев Ю. С., Сенчикина Р. С. и др. Гетеропереходы Si—GaAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии // ФТП.— 1989.— Т. 16, вып. 9.— С. 1654—1656.
2. Terletskaia L. L., Golubtsov V. V. Photoluminescence of heteroepitaxial gallium arsenide on silicon // Proc. 14th International school-seminar "Spectroscopy of molecules and crystals" (Odessa, Ukraine, 7—12 June, 1999).— Odessa: Astroprint, 1999.— P. 124.
3. Terletskaia L. L., Skobeeva V. M., Golubtsov V. V. Photosensors with Si—GaAs heterojunction as memory elements // Фотополупроводники.— 2001.— № 10.— С. 78—80.
4. Преснов В. А., Казаков А. И., Бровкин В. Н. Гетероэпитаксия арсенида галлия на кремнии // Кристаллография.— 1978.— Т. 23, № 1.— С. 222—223.
5. Василенко Н. Д., Терлецкая Л. Л. Анализ качества эпитаксиальных слоев соединений A^3B^5 для приборов СВЧ-техники (обзор) // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 1991.— Вып. 21.— С. 28—40.
6. Василенко Н. Д., Терлецкая Л. Л. Влияние светового воздействия на напряжение включения многослойной гетероструктуры Si—GaAs // Мат-лы Всесоюз. конф. "Фотополупроводниковые явления в полупроводниках".— Ашхабад: Ылым, 1991.— С. 273—274.
7. Василенко Н. Д., Терлецкая Л. Л. Эффекты накопления и запоминания в четырехслойной структуре $p^+(Si)-n(Si)-p(Si)-n^+(GaAs)$ // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 1992.— Вып. 22.— С. 17—20.