

ФОТОДИОДЫ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ GaP, GaP_xAs_{1-x} И GaAs ДЛЯ УФ И ВИДИМОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

В. И. Стафеев, И. Д. Анисимова

Научно-производственное объединение «Орион», 111123, Москва, Россия
(Получена 19 августа 1993 г. Принята к печати 6 сентября 1993 г.)

В настоящее время усилился интерес к полупроводниковым фотоприемникам с чувствительностью в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Это вызвано расширением сферы их применения в различных областях науки и техники: медицине, экологии, промышленном приборостроении (полиграфии, микроэлектронике, противопожарной системе и др.), научном приборостроении (спектрофотометрии, калориметрии, астрофизических исследованиях, хроматографии, биотехнологии, растениеводстве и др.); большие перспективы имеются в аппаратуре оборонного назначения.

Фотоприемники на основе широкозонных полупроводниковых материалов GaP, GaP_xAs_{1-x} и GaAs дают уникальную возможность создания фотоприемных устройств и приборов со спектральной чувствительностью в ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях спектра (200÷900 нм). Большая по сравнению с кремнием ширина запрещенной зоны приводит к таким параметрам фотодиодов, как более высокие рабочие температуры, высокая стабильность (в том числе и при повышенных уровнях засветки), радиационная стойкость. Использование GaP и GaP_xAs_{1-x} дает возможность создавать селективные фотодиоды, позволяющие работать без дополнительных фильтров, отсекающих длинноволновую область спектра. Преимуществом фотоприемников на этих материалах является единая технология их изготовления.

Одним из перспективных типов ультрафиолетовых фотоприемников является фотодиод с барьером Шоттки, у которого потенциальный барьер находится на поверхности, обеспечивая эффективное разделение носителей заряда непосредственно в области поглощения квантов высоких энергий.

Основы по исследованию fotocувствительности барьеров Шоттки на широкозонных полупроводниковых соединениях типа A^{III}B^V были заложены в работах сотрудников школы Д. Н. Наследова (например, [1,2]).

За рубежом выпуском УФ фотодиодов с барьером Шоттки на основе GaP и GaP_xAs_{1-x} занимается в основном фирма Hamamatsu (Япония) [3]. В научно-производственном объединении «Орион» с 1970 г. проведен широкий комплекс работ по разработке и исследованию высокочувствительных фотоприемников с барьером Шоттки на основе GaP, GaP_xAs_{1-x} и GaAs.

В качестве исходных материалов для разрабатываемых фотодиодов использовались эпитаксиальные однослойные структуры типа $n-n^+$ толщиной $(350 \pm \pm 20)$ мкм, в которых активной областью являлся нелегированный n -слой толщиной порядка 10 мкм. В структурах со слоем GaP_xAs_{1-x} подложкой являлся n^+ -GaAs, на который наращивался переходный слой с переменным составом фосфора толщиной 20 мкм. Содержание фосфора в n -слое составляло 25 и ~40%.

Концентрация носителей заряда в подложках всех трех типов структур равнялась $(3 \div 7) \cdot 10^{17}$ см⁻³. Концентрация носителей заряда в n -слое составляла

для GaP — $\leq 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, для GaP_xAs_{1-x} — $\leq 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, для GaAs — $\leq 5 \times 10^{14}$ см⁻³.

В качестве полупрозрачного барьерного контакта использовался слой золота, который характеризуется слабой зависимостью прозрачности от длины волны в рассматриваемом спектральном интервале, устойчивостью к воздействию внешней среды, достаточной адгезией при используемой технологии создания фотодиодов и сопротивлением растекания, достаточным для эффективного сбора носителей. Полупрозрачный слой золота толщиной ~100 Å наносился на свежетравленную поверхность *n*-слоя термическим напылением при давлении не более 10⁻⁷ мм рт. ст. Контроль толщины слоя золота проводился в процессе напыления. Выделение чувствительных площадок проводилось с помощью фотолитографии с дальнейшим вытравливанием меза-структур. При создании фотодиодов с просветляющим покрытием с целью повышения фоточувствительности в определенной области спектра использовались напыляемые слои SiO₂, ZrO₂, ZnS, Al₂O₃. Фоточувствительные элементы герметизировались в металлическом корпусе с окном из лейкоспандера или кварца. При монтаже в корпус используется кремнийорганический высокотемпературный клей К-400, позволяющий выдерживать температуру от -190 до +350 °С. Прочная конструкция обеспечивает электрическую и механическую надежность.

Разработанная технология позволила создавать фотодиоды как одноэлементные с размером чувствительной площадки 150 × 150 мкм, диаметрами 0,3, 1, 1,5, 2, 3, 5, 8 мм, так и многоэлементные в виде линейки с размером фоточувствительных элементов 150 × 150 мкм², зазором 30 мкм, числом элементов до 20 и линейки с размером чувствительной площадки 400 × 400 мкм², зазором 100 мкм и числом элементов до 32. Линейки фоточувствительных элементов были изготовлены на основе GaAs. Однако разработанная технология позволяет создавать аналогичные фоточувствительные линейки на основе GaP и GaP_xAs_{1-x}.

Исследование электрофизических характеристик фотодиодов показало, что они близки к идеальному барьеру Шоттки. Дифференциальные сопротивления *R* (при ±10 мВ) фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 1 мм составляют для GaP и GaP_xAs_{1-x} $R \geq 10^{11}$ Ом, для GaAs $R (\sim 10^8 \div 10^9)$ Ом. Значения емкости для GaP — ~300 пФ, для GaP_xAs_{1-x} — ~250 пФ, для GaAs — ~40 пФ. Оптимальный режим работы фотодиодов при напряжении смещения $U = 0$.

Фотодиоды на основе GaP

Фотодиоды с барьером Шоттки на основе GaP обладают фоточувствительностью в области (200 ÷ 510) нм (рис. 1). Максимум фоточувствительности (λ_{\max}) находится при (430 ÷ 440) нм. Токовая чувствительность при λ_{\max} достигает значения 0,15 А/Вт. При $\lambda = 300$ нм токовая чувствительность равна 0,06 А/Вт. Просветляющее покрытие приводит к повышению фоточувствительности в ~1,5 раза.

Высокие значения барьерной емкости (сотни пФ) и дифференциального сопротивления ($R_0 \geq 10^{11}$ Ом) затрудняют реализацию порога чувствительности, так как шум используемого при измерении операционного усилителя с сопротивлением обратной связи, равным 10¹⁰ Ом, превышал шум фотодиодов. Поэтому порог чувствительности оценивался по расчетному значению шумового тока I_n , который определялся измеряемыми значениями R_0 и токовой чувствительности при λ_{\max} (S_{\max}):

$$P_{th} = I_n / S_{\max} = \sqrt{4kT} / R_0 / S_{\max}.$$

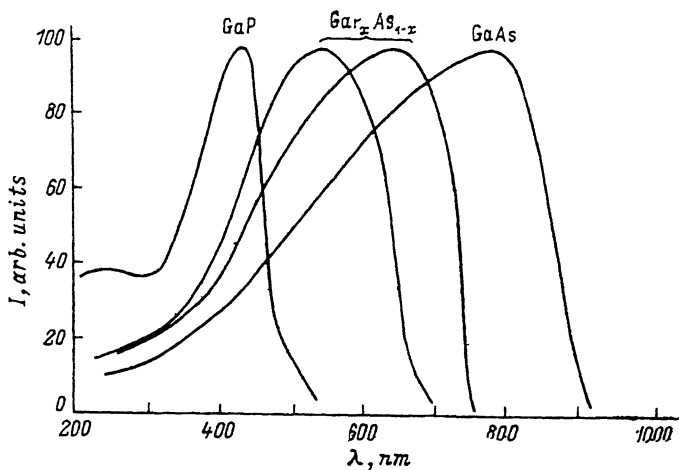


Рис. 1. Спектральные характеристики фотодиодов на основе GaP, GaP_xAs_{1-x} и GaAs.

Типичное значение порога чувствительности при λ_{\max} для фоточувствительной площадки с диаметром $(1 \div 1.5)$ мм не более $2 \cdot 10^{-15}$ Вт·Гц^{-1/2}. При этом в составе измерительного фотоприемного устройства порог чувствительности равен $(1 \div 2) \cdot 10^{-14}$ Вт·Гц^{-1/2} (при частоте ≤ 100 Гц).

Фотодиоды на основе GaP обладают широким динамическим диапазоном — от 10^{-12} Вт/см² до 10^{-2} Вт/см², фототок линейно зависит от мощности падающего излучения. Исследования, проведенные при длительном воздействии повышенной засветки мощностью $\sim 10^{-2}$ Вт/см² в спектральном диапазоне (320 ÷ 520) нм, показали высокую стабильность чувствительности фотодиодов. На рис. 2 приведены результаты исследований четырех фотодиодов в течение 1000 ч при $\lambda = 325$ и 440 нм. С точностью $\pm 5\%$ значения чувствительности оставались неизменными. Для сравнения приведены данные для кремниевого фотодиода [4]. Исследования инерционности фотодиодов на основе GaP, проведенные с использованием импульсного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 377$ нм и длительностью ≤ 10 нс при времени спада $\tau_s < 10$ нс, показали, что импульс фототовета имел $\tau_f \sim 10$ нс и $\tau_s \sim 20$ нс.

Разработанные фотодиоды способны работать в широком температурном диапазоне $-200 \div 250$ °С. Для исследования фотодиодов при повышенных температурах использовались фотодиоды, смонтированные на цоколе либо с помощью клея К-400, либо с механическим креплением. Первая группа приборов исследовалась до +250 °С. При более высоких температурах исследования проводились на фотодиодах с механическим креплением фоточувствительного элемента.

На рис. 3 приведены типичные спектральные характеристики фотодиодов на основе GaP при температурах $(-190 \div 320)$ °С. Из проведенных исследований следует, что в области (250 ÷ 410) нм чувствительность практически остается постоянной для температур $(-190 \div 300)$ °С. Это связано с тем, что поглощение происходит фактически на поверхности. С ростом температуры до 300 °С происходит изменение чувствительности при λ_{\max} в среднем не более 20% по сравнению с комнатной. Изменение длинноволновой части спектральной характеристики хорошо объясняется температурной зависимостью ширины запрещенной зоны GaP. Температурный коэффициент равен $6.5 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, что хорошо согласуется с данными работы [5].

До 300 °С изменения чувствительности являются обратимыми. При нагреве выше 300 °С происходит резкое необратимое падение чувствительности. Основ-

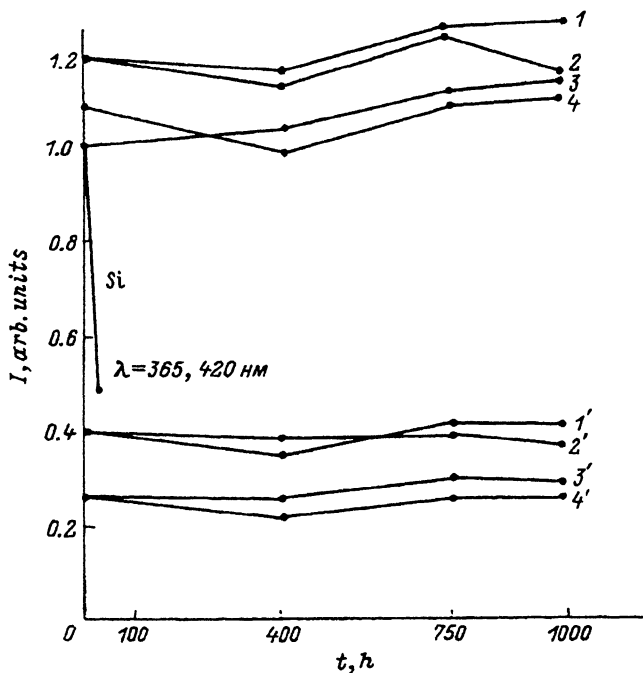


Рис. 2. Значения чувствительности 4 фотодиодов при засветке мощностью 10^{-2} Вт/см² в течение 1000 ч. Длины волн λ , нм: 1-4 - 440, 1'-4' - 325.

ной причиной этого является переход структуры золотой пленки из островково-непрерывной в ярко выраженную островковую, что приводит к резкому росту продольного сопротивления пленки и разрушению однородной структуры барьера Шоттки.

Фотодиоды на основе GaP_xAs_{1-x}

Фотодиоды на основе GaP_xAs_{1-x} представляют дополнительный интерес, кроме перечисленных выше областей применения, из-за возможности изменять

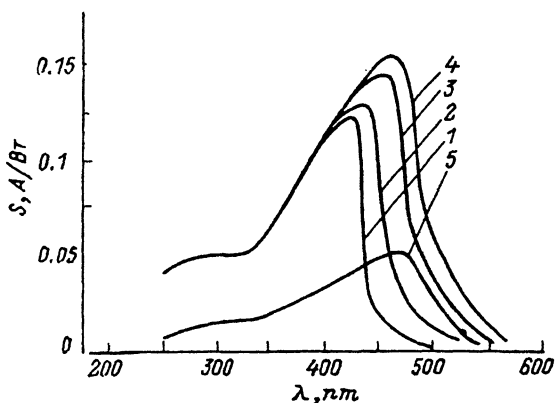


Рис. 3. Спектральные характеристики фотодиода на основе GaP при различных температурах. T, °C: 1 - 190, 2 - 20, 3 - 200, 4 - +300, 5 - 320.

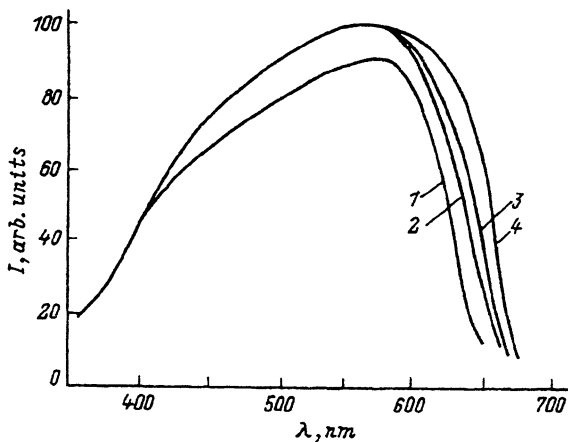


Рис. 4. Спектральные характеристики фотодиода на основе $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ при различных температурах. T , °C: 1 — -60, 2 — -22, 3 — 60, 4 — 120.

форму спектральной характеристики путем изменения процентного содержания фосфора. Таким путем создаются фотодиоды со спектральной характеристикой, близкой к формам кривых спектральной чувствительности глаза и фотопленки, что является одним из важнейших требований, предъявляемых к фотоприемникам для экспонетрических устройств. По сравнению с кремниевыми фотоприемниками здесь не требуется корреляция спектральной характеристики фильтрами.

Разработанные фотодиоды с барьером Шоттки на основе $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ обладают фоточувствительностью в области (250÷680) нм при $x=0.39$ и (250÷740) нм при $x=0.25$ (рис. 1). Максимум фоточувствительности приходится на $\lambda = 550$ и 650 нм соответственно. Токовая чувствительность при λ_{max} достигает значения 0.22 А/Вт, при $\lambda = 300$ нм — 0.03 А/Вт. Как и в случае фотодиодов на основе GaP порог чувствительности при λ_{max} оценивался расчетным путем и был $\sim 1 \cdot 10^{-15}$ Вт·Гц^{-1/2} для фотодиодов с диаметром площадки 1 мм. В составе фотоприемного устройства порог чувствительности $\geq 1.8 \cdot 10^{-14}$ Вт·Гц^{-1/2}. Динамический диапазон фоточувствительности охватывает область (10⁻¹²÷10⁻²) Вт/см². Исследования, проведенные при освещении фотодиодов от источника типа А, показали линейную зависимость фототока от освещенности вплоть до 60 000 лк. Исследование частотной характеристики фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 1 мм при частоте до 1000 Гц показали, что фоточувствительность остается постоянной.

Влияние температуры на основные характеристики фотодиодов на основе $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ изучалось в диапазоне (-60÷120) °C. Результаты представлены на рис. 4. При повышенных температурах в коротковолновой части спектра фоточувствительность не изменяется. Сдвиг чувствительности в длинноволновой области объясняется совокупностью температурной зависимости края собственного поглощения [6] и температурным ростом диффузионной составляющей фототока.

Фотодиоды на основе GaAs

Фотодиоды с барьером Шоттки на основе GaAs обладают широкой областью фоточувствительности от 250 до 900 нм (рис. 1). Длина волны в максимуме фоточувствительности находится вблизи 800 нм. Токовая чувствительность при λ_{max} достигает 0.5 А/Вт, при $\lambda = 300$ нм — 0.04 А/Вт. Типичное значение

порога чувствительности при λ_{\max} для фоточувствительной площадки с диаметром 1 мм $\sim 1.5 \cdot 10^{-14}$ Вт·Гц $^{-1/2}$. Ввиду более высокого значения шумового тока по сравнению с фотодиодами на GaP и GaP $_x$ As $_{1-x}$ измеряемые величины порога чувствительности совпадают с расчетными. Динамический диапазон фотодиодов охватывает область ($10^{-12} \div 10^{-5}$) Вт/см 2 . При больших падающих мощностях наблюдается отклонение от линейности. Исследование инерционности фотодиодов показало, что при диаметре площадки 300 мкм время фотоответа составляет 100 пс. Исследование влияния температуры на основные параметры фотодиодов показало, что в диапазоне ($-40 \div 80$) °C не происходит изменения спектральной чувствительности. Порог чувствительности при -40 °C улучшается в 2—2.5 раза, при повышении температуры до 60 °C ухудшается в 2 раза.

На основе разработанных фотоприемников было изготовлено несколько типов приборов:

— одноканальные фотоприемные устройства (ФПУ) на основе фотодиодов из GaP, GaP $_x$ As $_{1-x}$ GaAs с высокой вольтовой чувствительностью ($\sim 10^8$ В/Вт) и порогом чувствительности $\sim 1 \cdot 10^{-14}$ Вт·Гц $^{-1/2}$ в максимуме спектральной чувствительности. Габаритные размеры ФПУ: $20 \times 14 \times 4$ мм 3 и $\varnothing 30 \times 17.5$ мм 3 ;

— 10-канальное ФПУ на основе линейки из GaAs с вольтовой чувствительностью 4×10^8 В/Вт и порогом чувствительности $\sim 2 \times 10^{-14}$ Вт·Гц $^{-1/2}$ при $\lambda = \lambda_{\max}$. Габаритные размеры: $\varnothing 30 \times 55$ мм 3 . Прибор был использован в спектрометре радиофотометрического комплекса на аппарате «ФОБОС»;

— 13-канальное ФПУ на основе линейки из GaP $_x$ As $_{1-x}$ с близкими к ФПУ из GaAs параметрами;

— измеритель освещенности и экспозиции излучения, состоящий из фотоприемника (на три диапазона) в виде выносной головки и электронного измерительного блока с цифровой индикацией. Габаритные размеры головки — $\varnothing 20 \times 7$ мм 3 , блока — $150 \times 70 \times 25$ мм 3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. А. Гуткин, М. В. Дмитриев, Д. Н. Наследов, А. В. Поликовский. ФТП, 5, 1927 (1971).
- [2] Б. В. Царенков, Ю. А. Гольдберг, Г. В. Гусев, В. П. Огурцов. ФТП, 8, 410 (1974).
- [3] Каталог «Nipponatsu». Фотоприемники Si, GaPAs, GaP. Япония (1991).
- [4] A. D. Wilson, H. Lyall. Appl. Optics, 25, 4530 (1986).
- [5] В. В. Соболев. Оптические фундаментальные спектры соединений группы A 3 B 5 . Кишинев: Штиинца (1979).
- [6] А. Н. Пихтин, В. Н. Разбегалов, Д. А. Яськов. ФТП, 7, 471 (1973).

Редактор Т. А. Полянская