

ческую погрешность поддержания заданного напряжения до ± 1 мВ и обеспечить максимальную скорость нарастания напряжения 1 В/мс.

Таким образом, на основе предложенных принципов построения ИПКВ оказалось возможным строить сравнительно несложные, достаточно точные (класса 0,1—0,5) и с умеренной стоимостью измерительные преобразователи комплексной проводимости в напряжение для двух- и трехполюсных объектов при одновременном поддержании между определенными полюсами объекта требуемого измерительного режима по постоянному току.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахутин В. М. и др. Применение частотных методов для исследования физиологических объектов.— В кн.: Бионика и математическое моделирование в биологии: Семинар. Киев: изд. ИК АН УССР, 1966.
2. Карандеев К. Б. и др. Быстродействующие электронные компенсационно-мостовые приборы.— М.: Энергия, 1970.
3. Измерение комплексных проводимостей в физико-химическом эксперименте: Сб. — М.: Энергия, 1970.
7. Гриневич Ф. Б. Автоматические мосты переменного тока.— Новосибирск: изд. РИО СО АН СССР, 1964, с. 12.

Поступило в редакцию 6 декабря 1978 г.;
окончательный вариант — 11 февраля 1981 г.

УДК 537.311.33.082.52

Б. С. ВАКАРОВ, И. С. ВАКАРОВА, В. Н. ВИШНЯКОВ
(Одесса)

ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ БАРЬЕРА ШОТТКИ И ИЗОТИПНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

В ряде работ [1—3] сообщается о фоточувствительных структурах, обладающих инверсией знака в спектре фототока и представляющих, таким образом, определенный интерес с точки зрения их использования в оптоэлектронных устройствах [4]. Указанная особенность фототока обусловлена разделением генерируемых светом носителей тока двумя расположенными на различной глубине слоями объемного заряда со встречно-направленными внутренними электрическими полями.

В настоящей работе приведены результаты исследования фотоэлектрических свойств структуры металл — $n^+Al_xGa_{1-x}As$ — $nGaAs$, являющейся комбинацией барьера Шоттки (металл — $n^+Al_xGa_{1-x}As$) и гетероперевода ($n^+Al_xGa_{1-x}As$ — $nGaAs$). Присутствие в данной структуре двух неэквивалентных областей пространственного заряда определяет форму кривой спектрального распределения фототока: в ней наблюдаются две точки, в которых фототок меняет знак.

Изотипные гетеропереходы $Al(GaAs)$ — $GaAs$ создавались жидкофазным эпитаксиальным наращиванием на $GaAs$ -подложку твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ с различной величиной молярной доли алюминия ($0,2 < x < 0,7$). Эпитаксиальные слои легировались теллуром, и толщина их после обработки поверхности для нанесения слоя металла составляла 20—30 мкм. Выращенные твердые растворы имели переменный состав в направлении, перпендикулярном поверхности слоя, их ширина запрещенной зоны убывала по мере удаления от границы раздела с градиентом около 0,01 эВ/мкм. Концентрация носителей в $GaAs$ -подложке составляла величину $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$, а уровень легирования эпитаксиального слоя был заметно выше 10^{18} см $^{-3}$. Омический контакт к подложке осуществлялся сплавлением In [5], а барьер Шоттки — химическим осаждением [6] полупрозрачного слоя золота на обработанную стандартными методами поверхности твердого раствора.

Исследование фотоэлектрических свойств структуры проводилось методом синхронного детектирования в режиме тока короткого замыкания при нулевом смещении и при подаче смещения обеих полярностей. Освещение структуры осуществлялось со стороны твердого раствора.

Результаты измерений при ~ 300 К спектрального распределения фототока I_{ϕ} структур с различным значением параметра x показаны на рис. 1. В спектрах фоточувствительности содержится две точки инверсии знака фототока, причем для всех

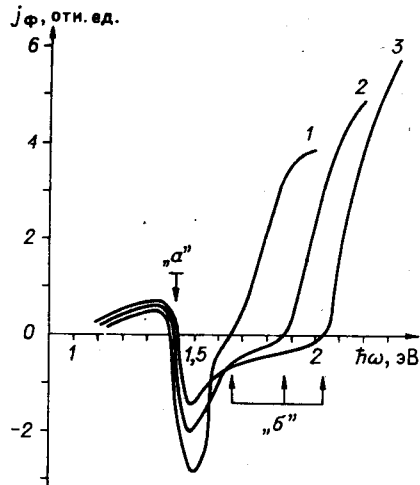


Рис. 1. Спектральное распределение фототока j_{ϕ} при нулевом смещении структур $M-n^+Al_xGa_{1-x}As-nGaAs$ с различной молярной долей алюминия x :
1 — 0,2; 2 — 0,4; 3 — 0,7.

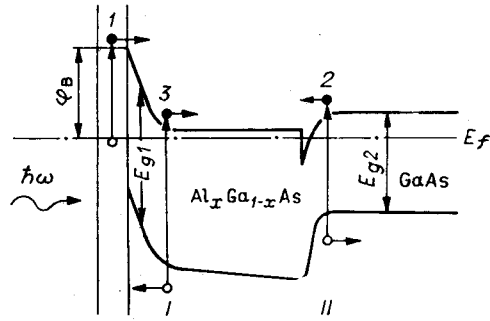


Рис. 2. Энергетическая зонная диаграмма структуры $M-n^+Al(GaAs)-nGaAs$:
1 — фотоэмиссия электронов из M в твердый раствор $Al(GaAs)$; 2 — разделение носителей полем гетероперехода II ; 3 — разделение носителей полем барьера Шоттки I .

исследованных структур одна точка инверсии «а» наблюдается при $\hbar\omega \approx 1,43$ эВ, что соответствует значению ширины запрещенной зоны $GaAs(E_{g2})$, а вторая точка инверсии «б» расположена в спектральном диапазоне $1,65 \div 2,05$ эВ в зависимости от величины параметра x . Ее положение достаточно хорошо совпадает со значением ширины запрещенной зоны $Al_xGa_{1-x}As$ на границе с металлом (E_{g1}).

На рис. 2 показана зонная диаграмма исследуемой структуры. При ее построении учитывалось, что в гетеропереходе $GaAs-Al(GaAs)$ разрыв в валентной зоне близок к нулю [7] и что для барьеров Шоттки металл — $nAl_xGa_{1-x}As$ ($0,2 < x < 0,7$) высота барьера ϕ_B определяется соотношением $\phi_B \approx (2/3)E_{g1}$ [8]. На диаграмме отмечены три типа оптических переходов, которые могут быть реализованы при разных энергиях фотонов исследуемого спектрального диапазона.

Согласно работе [1] фототок структуры с двумя потенциальными барьерами описывается выражением

$$j_{\phi} = (kj_{\phi 1} - j_{\phi 2}) / (1 + k),$$

где $j_{\phi 1}$ и $j_{\phi 2}$ — фототоки, связанные с разделением генерированных светом носителей полями барьеров I и II соответственно, а k — отношение дифференциальных проводимостей барьеров II и I . В интервале энергий фотонов $\hbar\omega = 1,0 \div 1,43$ эВ ($\phi_B < \hbar\omega < E_{g2}$) фототок обусловлен эмиссией электронов из металла в эпитаксиальную пленку и их разделением в поле барьера Шоттки ($j_{\phi 2} = 0, j_{\phi} > 0$).

С ростом энергии фотонов ($E_{g2} < \hbar\omega < E_{g1}$) начинается поглощение в $GaAs$ -подложке, так как фотоны с энергией, меньше E_{g1} , свободно проходят через широкозонное «окно». Причем вначале поглощение идет за область «провала», поскольку ввиду наличия инверсионного слоя оптическая ширина запрещенной зоны в этой области увеличена.

Генерированные светом носители разделяются электрическим полем гетероперехода, происходит инверсия знака фототока и резкое его возрастание в отрицательной области ($j_{\phi 2} > kj_{\phi 1}, j_{\phi} < 0$). Однако, начиная с энергий фотонов $\hbar\omega \approx 1,5$ эВ, наблюдается уменьшение отрицательного фототока, возможно, связанное с тем, что основное поглощение происходит непосредственно в области провала зоны проводимости и большая часть генерированных светом электронно-дырочных пар быстро рекомбинирует, не давая вклада в фототок.

При дальнейшем возрастании энергии фотонов ($\hbar\omega > E_{g2}$) прекращает действовать эффект «окна», начинается обычное межзонное поглощение в твердом растворе и фототок вновь меняет свой знак, поскольку при этом фотоносители разделяются полем барьера Шоттки ($j_{\phi 2} = 0, j_{\phi} > 0$).

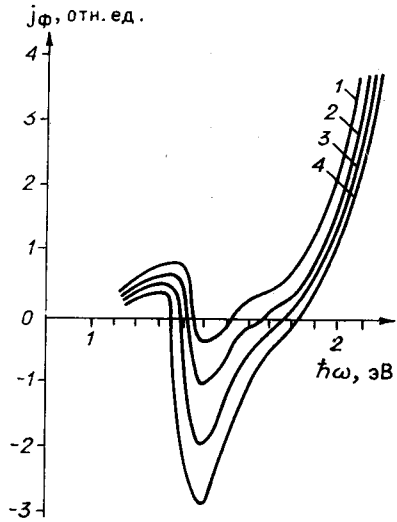


Рис. 3. Спектральное распределение фототока структуры с $x = 0,3$ при разных напряжениях смещения U, V :
1 — -1,0; 2 — -0,5; 3 — 0; 4 — +2.

Следует отметить, что величина фоточувствительности в областях 1 и 2 намного меньше, чем в области 3, так как фототок барьера Шоттки за счет эмиссии электронов из металла намного меньше фототока в области собственного поглощения полупроводника [9], а носителям, генерированным в GaAs-подложке и разделяемым полем гетероперехода, необходимо преодолеть поверхностный потенциальный барьер Φ_B .

Кроме того, величина отрицательного максимума фототока в диапазоне энергий фотонов $E_{g2} < \hbar\omega < E_{g1}$ зависит от молярной доли алюминия x в твердом растворе (см. рис. 2) и уменьшается с увеличением x , т. е. с увеличением ширины запрещенной зоны $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Подобная закономерность, очевидно, связана с увеличением энергетического разрыва в зоне проводимости в гетеропереходе, величина которого определяет долю прошедших через гетеропереход электронов, а следовательно, и значение фототока.

Результаты исследования влияния напряжения смещения на фоточувствительность структуры представлены на рис. 3. Наблюдаемое изменение спектрального распределения фоточувствительности и положение точки «б» инверсии знака фототока обусловлены изменением дифференциальных проводимостей барьеров I и II (изменение величины k в выражении для j_{Φ}). Действительно, при приложении отрицательного смещения (что соответствует обратному смещению для барьера Шоттки) высота поверхностного потенциального барьера Φ_B увеличивается, а высота барьера гетероперехода соответственно уменьшается, что и приводит к более эффективному разделению фотогенерированных носителей полем барьера Шоттки. Следовательно, фототок в области $\hbar\omega > E_{g1}$ возрастает, в области $E_{g2} < \hbar\omega < E_{g1}$ уменьшается, а точка инверсии «б» смещается в сторону меньших энергий фотонов. Аналогично смещение противоположной полярности оказывает обратное действие на спектральные характеристики фототока.

Следует отметить, что наличие в спектре фототока трех участков, отличающихся знаком, наблюдается при ~ 300 К, тогда как у фотоприемников, предложенных в [2], либо вообще не наблюдается отрицательный максимум, либо он обнаруживается лишь при ~ 80 К. Подобное отличие связано с тем, что в исследуемой структуре фотоэлектроны, эмиттируемые из металла в полупроводник и разделяемые полем барьера Шоттки, почти беспрепятственно проходят во внешнюю цепь. По этой же причине падение напряжения $\Delta\phi$, возникающее на переходах I и II при освещении структуры светом с энергией фотонов $\hbar\omega < E_{g2}$, мало, и, следовательно, спектральное положение точки «а» инверсии знака должно слабо зависеть от интенсивности света [1].

При освещении структуры светом, поглощаемым в GaAs-подложке, фотогенерированные электроны вынуждены преодолевать потенциальный барьер Φ_B , что ведет к их накоплению в эпитаксиальном слое и увеличению $\Delta\phi$. Следовательно, спектральное положение точки «б» инверсии должно в большей степени зависеть от освещенности. Тем не менее эта зависимость оказывается не очень сильной в силу того, что в рассматриваемой структуре, как было указано ранее, при приближении энергии фотонов к значению E_{g1} $j_{\Phi 2}$ резко падает, а $j_{\Phi 1}$ резко возрастает.

В исследованном диапазоне освещенностей (до $\sim 10^{-3}$ Вт/см²) люкс-амперная характеристика образцов оставалась линейной, а спектральное положение точек инверсий знака фототока «а» и «б» — неизменным с точностью до 0,01 эВ. Для структуры, предложенной в работе [1], этот диапазон освещенностей на порядок меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакарова И. С., Гуткин А. А., Дмитриев М. В. Фотоприемник с зависящим от длины волны света знаком фототока на основе Au—nSi—pSi.— ФТП, 1978, т. 12, вып. 4.
2. Дмитриев М. В., Преснов В. А., Хаит В. М. Фоточувствительность структур с барьером Шоттки Au—pAlGaAs—nGaAs в диапазоне спектра 0,5 ÷ 3 эВ.— В кн.: Исследование полупроводниковых соединений сложного состава и p-n-переходов на их основе. Элиста: изд. Калмыцкого ГУ, 1976, вып. 1.
3. Юабов Ю. М., Щепиот У. В., Исамухамедова Д. К., Цветков А. Г. Поверхностно-барьерные фотоприемники на кремнии.— ФТП, 1978, т. 12, вып. 3.
4. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник.— М.: Мир, 1975.
5. Арсенид галлия. Получение, свойства и применение/Под ред. Ф. П. Кесаманлы и Д. И. Наследова.— М.: Наука, 1973.
6. Гольдберг Ю. А., Царенков Б. В. Способ приготовления полупроводниковых приборов с поверхностным барьером. (Автор. свид-во № 392845).— БИ, 1975, № 35.
7. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Зимогорова Н. С., Третьяков Д. Н. Фотоэлектрические свойства гетероперехода $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ —GaAs.— ФТП, 1969, т. 3, вып. 11.
8. Вакаров Б. С., Вишняков В. И. Исследование барьерных структур металл— $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в широком диапазоне составов твердого раствора.— ФТП, 1978, т. 12, вып. 8.
9. Mead C. A. Metall-Semiconductor Surface Barriers.— Solid State Electron., 1966, vol. 9, N 11—12.

Поступило в редакцию 9 октября 1981 г.