

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВНЫХ $p^+ - n$ -ГЕТЕРОСТРУКТУР ИЗ $Al_xGa_{1-x}As$

Кавалюскас А. А., Пека Г. П., Приступа П. В.,
Смоляр А. Н., Черюканов С. Д., Шиленас А. Л., Шимулите Е. А.

Исследовано влияние слабого поперечного магнитного поля на вольтамперные характеристики плавных $p^+ - n$ -гетероструктур из $Al_xGa_{1-x}As$ ($0 \leq x \leq 0.43$) при прямом и обратном смещениях. Особенностью ВАХ при прямом смещении является наличие участка ОДС S -типа, параметры которого существенно зависят от величины и направления магнитного поля. Высокая магниточувствительность (~ 80 В/Т при прямом смещении и ~ 20 В/Т — при обратном) объясняется магнитоконцентрационным эффектом в варизонной базе, неоднородной по времени жизни инжектированных неосновных носителей заряда, и тянущим встроенным квазиэлектрическим полем.

Полупроводниковые приборы, чувствительные к магнитному полю, находят все более широкое применение в технике [1]. Наряду с совершенствованием магниторезисторов и датчиков Холла большой интерес вызывают приборы, в основе работы которых лежат магнитодиодный и магнитоконцентрационный эффекты в длинной базовой области ($l \gg L$) [2]. Наиболее перспективными для изготовления таких приборов являются соединения $A^{III}B^V$ и твердые растворы на их основе, поскольку позволяют подбором легирующих примесей, химического состава в сочетании с высокой подвижностью носителей заряда и широкой запрещенной зоной реализовать оптимальные параметры активной области прибора для достижения максимальной магниточувствительности, быстродействия, температурной стабильности [2, 3].

В настоящей работе исследовались особенности ВАХ $p^+ - n$ -гетероструктур $GaAs(Zn) - Al_xGa_{1-x}As$ ($x \leq 0.43$) с варизонной базой, полученных методом жидкостной эпитаксии, в слабом (до 0.2 Т) поперечном магнитном поле. Ширина запрещенной зоны $E_g(z)$ уменьшалась в направлении от $p^+ - n$ -перехода в глубину базы. Контакты к образцам изготавливались вплавлением индия в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. при $T = 600$ К в течение 5 мин. ВАХ исследовались при помощи характеристикографа, собранного на базе двухкоординатного самопишущего потенциометра Н306 и осциллографа С1-69. Измерения проводились при $T = 77$ К.

Прямая ветвь ВАХ. На рис. 1 приведены типичные ВАХ (прямые ветви) $p^+ - n$ -гетероструктур без магнитного поля и в поперечном магнитном поле B . Характерной особенностью прямой ветви ВАХ является наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) S -типа. Напряжение переключения V_{II} для различных образцов составляет $4 - 35$ В, отношение напряжения переключения к остаточному напряжению V_0 лежит в пределах от 2 до 14. Поперечное магнитное поле значительно увеличивает как V_{II} , так и V_0 , уменьшает их отношение и при определенных значениях B приводит к исчезновению участка ВАХ с ОДС.

ВАХ структур при одной и той же величине B , но противоположных направлениях существенно различаются (кривые 3, 6).

Зависимости падения напряжения на структуре V и вольтовой магниточувствительности γ , от B , полученные в различных точках ВАХ при сопротивле-

нии нагрузки $R_n = 1$ кОм, представлены на рис. 2, а. В области малых значений V напряжение на структуре практически не зависит от магнитного поля, соответственно γ_v мала и также не зависит от B . При величине $B \approx 0.1$ Т наблюдается резкий рост γ_v , усиливающийся при увеличении тока через структуру, достигая максимальных значений после переключения. При дальнейшем увеличении B зависимость $V(B)$ насыщается, поэтому $\gamma_v(B)$ является немонотонной и имеет максимум, положение которого сдвигается в область меньших значений B при увеличении тока через структуру. Следует отметить, что некоторые из исследованных структур имеют несколько участков насыщения зависимости $V(B)$ и соответственно несколько максимумов на кривой $\gamma_v(B)$ при разных значениях B .

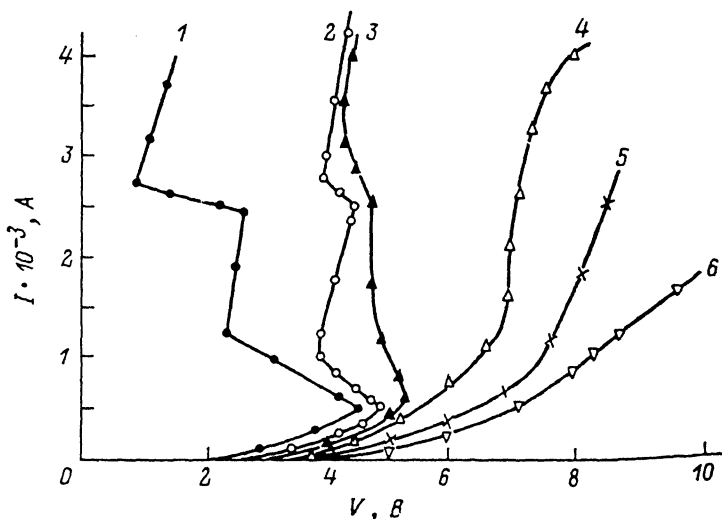


Рис. 1. Вольтамперные характеристики $p^+ - n$ -гетероструктур из $Al_xGa_{1-x}As$ ($0 \leq x \leq 0.43$) при $T = 77$ К в поперечном магнитном поле.

1 — $B = 0$. В, Т; 2 — 0.12, 3 — 0.19, 4 — 0.15, 5 — 0.17, 6 — 0.19.

Обратная ветвь ВАХ. На обратной ветви ВАХ участки ОДС отсутствуют, но магниточувствительность также высокая (рис. 2, б). Характер зависимости $V(B)$ аналогичен подобной зависимости для прямой ветви ВАХ. Поэтому кривая $\gamma_v(B)$ также имеет максимум, однако в отличие от прямой ветви ВАХ заметного сдвига максимума с изменением тока не наблюдается.

Обсуждение результатов. Для объяснения экспериментально наблюдаемой высокой магниточувствительности $p^+ - n$ -гетероструктур $GaAs(Zn) - Al_xGa_{1-x}As$ ($0 \leq x \leq 0.43$) с варизонной базой рассмотрим возможные механизмы влияния магнитного поля на процессы, определяющие параметры ВАХ. Наиболее вероятной причиной магниточувствительности может быть влияние B на длину пробега носителей заряда из-за уменьшения их подвижности (магнитодиодный эффект) либо из-за изменения эффективного времени жизни (магнитоконцентрационный эффект).

Для оценки вклада магнитодиодного эффекта была рассчитана вольтовая магниточувствительность для простой модели длинного магнитодиода с варизонной однородно легированной базой n -типа с линейно уменьшающейся от гетероперехода шириной запрещенной зоны $E_g(z)$ и не зависящими от координаты и уровня инжекции подвижностью и временем жизни дырок [3]. Рассмотрено диффузионное приближение с учетом встроенного квазиэлектрического поля $E_0 = q^{-1} \nabla E_g(z)$. При значениях параметров исследованных нами гетероструктур рассчитанное значение магниточувствительности составляет $\gamma_v = 0.8$ В/Т, что меньше величины, наблюдаемой экспериментально на участке до переключения, в ~ 100 раз. Таким образом, магнитодиодный эффект не позволяет объяснить экспериментально наблюдаемую высокую вольтовую магниточувствительность на прямой и тем более на обратной ветвях ВАХ. Кроме того, в рамках магнито-

диодного эффекта не удается объяснить падающий участок зависимости γ_v (В), а также зависимость величины γ_v от полярности магнитного поля.

Влияние В на ВАХ исследованных плавных $p^+ - n$ -гетероструктур максимально, когда вектор магнитной индукции перпендикулярен линиям тока в базе (угол Холла максимален). Экспериментально наблюдается существенная зависимость падения напряжения на структуре V и γ_v от угла α между вектором

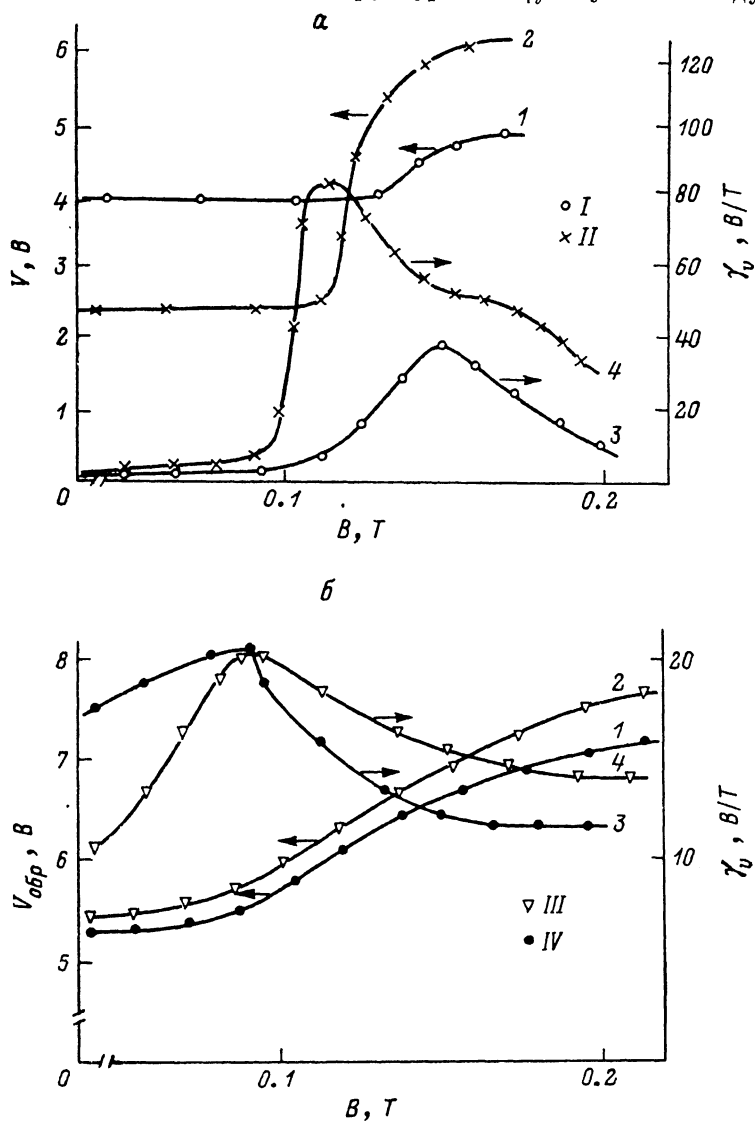


Рис. 2. Зависимость падения напряжения V (1, 2) и вольтовой магниточувствительности γ_v (3, 4) от магнитного поля на прямой (а) и обратной (б) ветвях ВАХ.

$I, \text{мА}$: I — 0.5, II — 2.5; $I, \text{мкА}$: III — 10, IV — 100.

магнитной индукции В и осью Х с произвольно выбранным направлением (рис. 3). При вращении структуры в магнитном поле вокруг оси Y, параллельной линиям тока, когда векторы тока и магнитного поля остаются взаимно перпендикулярными, падение напряжения на структуре может увеличиваться или уменьшаться относительно значения, полученного при $B=0$. Соответственно γ_v может принимать положительные или отрицательные значения. Углы α , при которых достигаются экстремальные значения V , различаются на 180° , что соответствует взаимно противоположным направлениям силы Лоренца. Такой ход зависимости V и γ_v от В дает основание полагать, что высокая магниточувствительность исследованных структур объясняется магнитоконцентрацион-

ным эффектом в базе магнитодиода, неоднородной по времени жизни. Внешнее магнитное поле, отклоняя поток инжектированных носителей в область с другим значением времени жизни τ , вызывает изменение их концентрации. Это приводит при постоянном токе к сильной зависимости напряжения на структуре от B . Когда магнитное поле отклоняет инжектированные носители заряда в область с меньшим τ , напряжение на структуре увеличивается и γ_v положительно. Если структуру повернуть теперь на 180° вокруг оси, параллельной линиям тока, то сила Лоренца изменит свой знак и магнитное поле будет отклонять носители в сторону, противоположную области с малым τ . Падение напряжения на структуре уменьшится, а γ_v будет отрицательной.

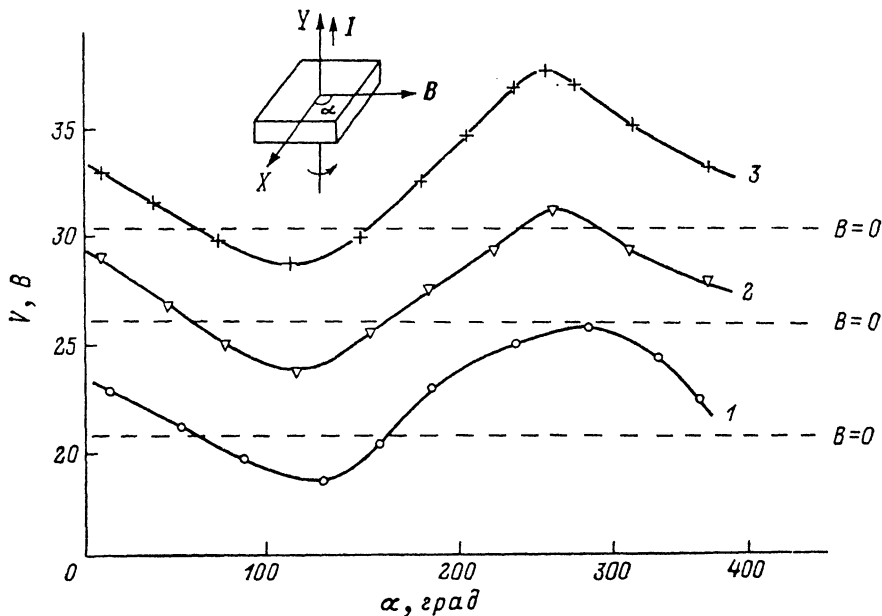


Рис. 3. Зависимость напряжения на структуре от угла поворота.

$B=0.16$ Т; $T=77$ К. I , мА: 1 — 0.5, 2 — 1, 3 — 3.

Неоднородность по времени жизни неосновных носителей заряда может быть связана с неравномерным распределением глубоких центров по объему базы. При этом рост γ_v с увеличением B можно объяснить плавной границей областей с различными значениями времени жизни τ , а также плавным изменением концентрации инжектированных носителей заряда в плоскости базы, перпендикулярной линиям тока. Падающий участок зависимости $\gamma_v(B)$, вероятно, связан с насыщением изменения концентрации неосновных носителей заряда под действием магнитного поля в случае, когда максимум поперечного распределения неосновных носителей заряда геометрически совпадает с рекомбинационной областью. Аналогичный механизм высокой магниточувствительности наблюдался авторами [4] в симметричных структурах, изготовленных из GaAs(Cr). Вольтовую магниточувствительность для этого случая можно представить в виде

$$\gamma_v = \left. \frac{dV}{dB} \right|_{I=\text{const}} = \frac{KI^{1/2}}{2C(1+BC^{-1})^{1/2}}, \quad (1)$$

где K и C — постоянные, характеризующие параметры материала, геометрические размеры областей базы с различными значениями τ и соотношение времени жизни в них.

Оценка магниточувствительности для случая модуляции сопротивления базы GaAs(Cr)-структур по τ -механизму на участках ВАХ после переключения в отсутствие шнурования тока совпала с экспериментальными результатами. Формула (1) описывает экспериментально наблюдаемое уменьшение γ_v с ростом B .

Для плавных гетероструктур $p^+ \text{-GaAs(Zn)-}n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с варизонной базой немонотонный ход зависимости $\gamma_p(\mathbf{B})$ и значительное увеличение γ_p на участке ВАХ после переключения по сравнению со значением до переключения могут быть связаны с явлением шнурования тока в S -диодах, поскольку при шнуровании происходит пространственная локализация носителей заряда, образующих неравновесную электронно-дырочную плазму, легко отклоняемую слабым магнитным полем. При наличии нескольких локализованных областей с малым временем жизни в базе на зависимости $\gamma_p(\mathbf{B})$ должны иметь место несколько максимумов, что наблюдается экспериментально.

Наличие градиента ширины запрещенной зоны в базе исследованных структур способствует затягиванию неосновных носителей заряда в глубь базы и улучшению ее модуляции. Это снижает падение напряжения на структуре в отсутствие магнитного поля, в результате чего вольтовая магниточувствительность при магнитоконцентрационном эффекте должна возрасти.

Таким образом, наиболее вероятным, по нашему мнению, механизмом магниточувствительности $p^+ \text{-}n$ -гетероструктур на основе $\text{GaAs(Zn)-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 0.43$) является влияние магнитного поля на эффективное время жизни неравновесных носителей заряда, что связано с рекомбинационной неоднородностью материала базы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. М., 1983. 100 с.
- [2] Гуменюк С. В., Подлепецкий Б. И., Симаков А. Б. — Зарубежн. электрон. техн., 1983, № 7 (265), с. 33—67.
- [3] Пека Г. П., Смоляр А. Н. — Ст. деп. М.: ЦНИИ «Электроника». 1985. № Р-4110.
- [4] Бродовой В. А., Пека Г. П., Смоляр А. Н., Черюканов С. Д. — ФТП, 1980, т. 14, в. 9, с. 1865.

Киевский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

Получена 22.02.1988
Принята к печати 26.07.1988