

©1995 г.

ПОПЕРЕЧНАЯ ФОТОЭДС В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ

Л.В.Шеховцов, А.В.Саченко, Ю.М.Шварц

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,
252650, Киев, Украина
(Получена 12 мая 1994 г. Принята к печати 21 сентября 1994 г.)

Экспериментально исследована поперечная фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре Ge-GaAs при $T = 300$ К. Вид спектральных характеристик фотоэдс указывает на наличие переходного слоя между пленкой Ge и подложкой GaAs. Немонотонная зависимость амплитуды фотоэдс от подсветки связана с наличием системы «дрейфовых» и «рекомбинационных» барьеров в объеме гетероструктуры.

Предложена модель зонной структуры в виде «пленка-переходной слой с переменной шириной запрещенной зоны-подложка».

1. Идея выращивания монокристаллических пленок германия на полуизолирующей подложке арсенида галлия [1] представлялась удачной не только вследствие близости параметров кристаллических решеток Ge и GaAs. Неизбежный эффект перекрестного легирования в процессе формирования гетероструктуры можно использовать для получения пленок германия с различными свойствами в зависимости от концентрации атомов Ga и As. С точки зрения макроскопических электрофизических свойств такой технологический способ считается в какой-то степени управляемым [2]. Однако микроскопические свойства пленки германия и границы раздела Ge-GaAs могут весьма отличаться друг от друга в различных точках гетероструктуры. Достаточно очевидным является влияние структурного несовершенства подложки GaAs, методов подготовки ее поверхности перед процессом выращивания пленки германия, других технологических условий на идентичность электрофизических параметров получаемых слоев Ge. Такая характеристика, как удельное сопротивление (в частности, его однородность), является одной из наиболее важных в условиях протекания электрического тока.

Исследование фотоэлектрических свойств неоднородных полупроводников и полупроводниковых структур дает информацию об их макроскопических и микроскопических свойствах. Под макроскопическими здесь подразумеваются свойства, определяемые несовершенствами с характерными размерами объема кристалла, в котором отсут-

ствует градиент концентрации примеси. Под микроскопическими понимаются свойства, определяемые масштабом, сравнимым с радиусом экранирования потенциала примесного атома [3]. Исследование макроскопических и микроскопических характеристик гетероструктуры Ge-GaAs с помощью фотоэлектрических методов может позволить построить модель зонной диаграммы и выяснить ее зависимость от условий выращивания пленок Ge на полуизолирующей подложке GaAs.

2. Измерения проводились при температуре 300 К на гетероструктурах GaAs с монокристаллическими пленками Ge *p*-типа проводимости. Удельное сопротивление пленок Ge находилось в пределах $0.01 \div 0.3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, толщина пленки составляла порядка 0.2 мкм, толщина подложки полуизолирующего GaAs — 300 мкм.

Из пластины гетероструктуры вырезались образцы длиной $1.0 \div 1.2 \text{ см}$ и шириной $0.2 \div 0.3 \text{ см}$, омические контакты напаявались со стороны пленки Ge и во время измерений закрывались непрозрачными полосками бумаги для исключения попадания на них возбуждающего света. Монохроматический свет выходил из монохроматора, входная щель которого освещалась лампой накаливания КГМ-24/150. Световой поток модулировался с частотой 516 Гц. На опыте исследовалась спектральная характеристика фотоэдс, возникающей на контактах при освещении образца пучком монохроматического света, падающим перпендикулярно к поверхности образца со стороны пленки германия.

3. На рис. 1 представлено семейство спектральных характеристик фотоэдс, измеренных при различной интенсивности возбуждающего модулированного монохроматического света G_{\sim} . Каждая спектральная кривая снималась в условиях равенства количества падающих на образец квантов света в диапазоне длин волн $0.45 \div 1.0 \text{ мкм}$ (рис. 1, кри-

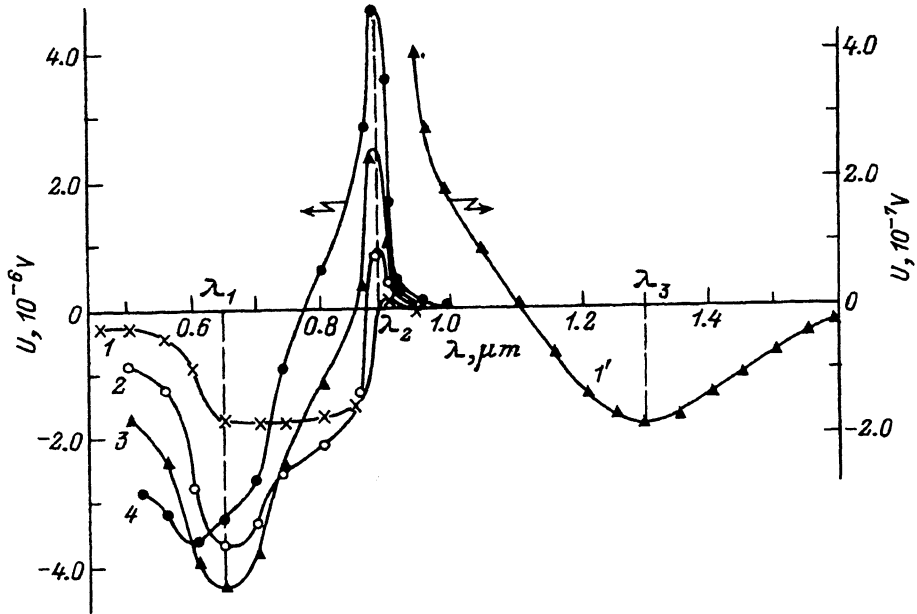


Рис. 1. Спектральные характеристики поперечной фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре Ge-GaAs при различной интенсивности потока квантов возбуждающего модулированного света G_{\sim} , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:

1 — $2.0 \cdot 10^{13}$, 2 — $5.4 \cdot 10^{13}$, 3 — $1.0 \cdot 10^{14}$, 4 — $2.14 \cdot 10^{14}$, 1' — $8.5 \cdot 10^{14}$.

вые 1-4). Часть спектральной характеристики в интервале длин волн $1.0 \div 1.7$ мкм измерялась при большей интенсивности потока квантов света, $G_{\sim} = 8.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Исходя из геометрии опыта и вида спектральных кривых можно выделить три характерные особенности. Во-первых, фотоэдс возникает в направлении, перпендикулярном падающему потоку света и градиенту концентрации генерированных электронно-дырочных пар, и, значит, параллельно границе раздела пленки и подложки. Во-вторых, спектральная характеристика фотоэдс дважды меняет знак и имеет три выраженных максимума вблизи длин волн 0.65, 0.89 и 1.3 мкм (им соответствуют энергии квантов света 1.9, 1.4 и 0.95 эВ). В-третьих, наблюдается нелинейная (как суперлинейная, так и сублинейная) и немонотонная зависимость амплитуды фотоэдс от интенсивности света, что легко определить, сравнивая значения эдс в местах расположения максимумов спектральных зависимостей.

4. К возникновению фотоэдс в измеряемом на опыте направлении могут привести, как минимум, две причины: деформация кристаллических решеток Ge и GaAs или градиент удельного сопротивления в пленке германия и прилегающей к ней области.

Как известно, германий является многодолинным полупроводником и деформация приводит к анизотропии электропроводности [4]. В этом случае при освещении деформированного кристалла может возникнуть фотоэдс в поперечном по отношению к потоку электронно-дырочных пар направлении.

В исследуемой гетероструктуре Ge-GaAs рост монокристаллической пленки германия происходит в кристаллографическом направлении [100], при этом направление деформации сжатия решетки германия лежит в плоскости (100) и, следовательно, симметрично относительно кристаллографических направлений [111], где расположены минимумы зоны проводимости. При этом в деформированной пленке германия анизотропия отсутствует, и, следовательно, причиной возникновения фотоэдс вдоль границы раздела Ge-GaAs является неоднородность удельного сопротивления структуры.

4а. Качественная картина распределения фотоэдс, определенная с помощью светового зонда шириной 0.3 мм, двигавшегося на опыте вдоль образца в направлении от одного контакта к другому, изображена на рис. 2. Известно, что объемная фотоэдс U пропорциональна градиенту удельного сопротивления ρ вдоль образца $U \sim d\rho/dx$ и времени жизни электронно-дырочных пар [5]. Поэтому из характера распределения эдс можно сделать вывод о том, что в образце существует плавный (с небольшой осцилляцией) градиент концентрации легирующей примеси и, соответственно, удельного сопротивления ρ . Из рис. 2 видно, что осцилляции удельного сопротивления вдоль образца имеют характерный размер порядка или меньше десятых долей миллиметра. Очевидно, что и в направлении роста пленки существуют неоднородности тех же размеров. Иначе говоря, эти неоднородности в исследуемых пленках германия толщиной ~ 0.2 мкм сравнимы с толщиной пленки или даже могут превышать ее. При изменении длины волны возбуждающего света с $\lambda_1 = 0.65$ мкм (рис. 2, а, кривая 1) на $\lambda_2 = 0.89$ мкм (рис. 2, а, кривые 2 и 3) знак фотоэдс изменяется на противоположный (причина отличия амплитуд кривых 2 и 3 будет проанализирована далее). Это свидетельствует о том, что преимущественное направление

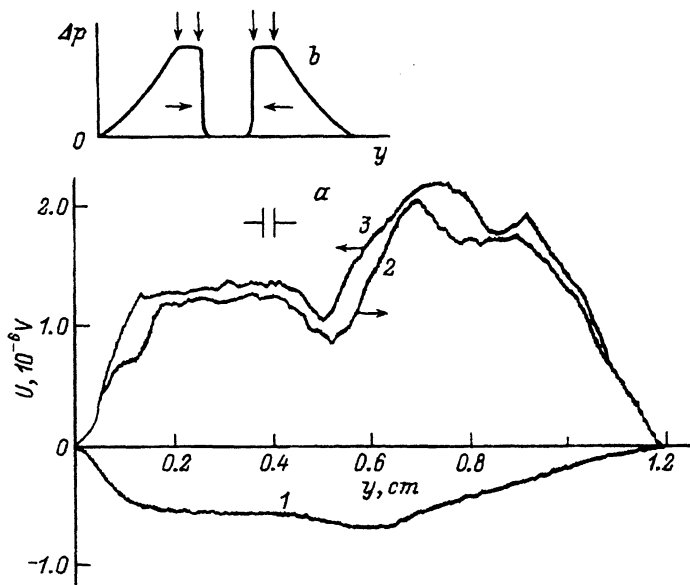


Рис. 2.

a — распределение фотоэдс при движении светового зонда вдоль образца. *b* — распределение концентрации неравновесных носителей заряда Δp при движении зонда. Стрелками указаны направления движения светового зонда.

градиента ρ в области границы раздела со стороны пленки германия противоположно направлению градиента вблизи подложки GaAs.

На рис. 3 представлена модель гетероперехода, в котором между пленкой и подложкой имеется переходный слой конечной толщины с плавно меняющимся уровнем легирования. По сути этот слой может представлять собой твердый раствор $\text{Ge}_x(\text{GaAs})_{1-x}$ с изменяющимся составом и шириной запрещенной зоны [6], причем x принимает случайные значения в различных точках границы раздела в зависимости от технологических условий выращивания пленки германия. Наличие непрерывного ряда твердых растворов с величиной x , изменяющейся от 0 до 1, для предлагаемой модели необязательно. На рис. 3 переход от ширины запрещенной зоны Ge к ширине запрещенной зоны GaAs показан условно.

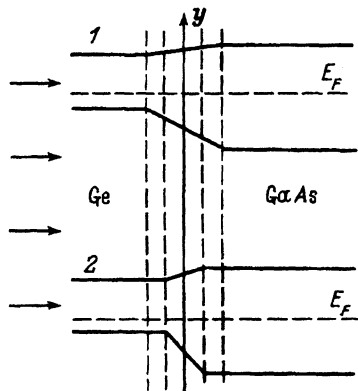


Рис. 3. Модель зонной структуры гетероперехода Ge-GaAs.

1 и *2* — точки, расположенные вдоль образца.

46. Основная особенность такой модели гетероперехода — это плавное изменение толщины переходного слоя и градиента его ширины запрещенной зоны вдоль образца. Принимая эту модель за основу, легко объяснить ход спектральной характеристики фотоэдс (рис. 1). В коротковолновой части спектра коэффициент поглощения света в германии составляет $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 0.5 \text{ мкм}$) [7]. При соответствующих энергиях квантов света поглощение происходит в узкой приповерхностной области пленки германия, и наличие высокой скорости поверхностной рекомбинации приводит к малой величине эдс. По мере уменьшения коэффициента поглощения света электронно-дырочные пары рождаются все глубже в объеме образца и эдс возрастает. Из рисунка ясно, что при таких коэффициентах поглощения света, когда электронно-дырочные пары будут рождаться в объеме, лежащем в основном слева от оси Y , градиент удельного сопротивления в этой области, направленный вдоль оси, будет определять знак фотоэдс с максимумом λ_1 . При уменьшении коэффициента поглощения света носители в возрастающей степени будут генерироваться справа от оси Y , где градиент удельного сопротивления направлен в противоположную сторону, и, следовательно, возникнет фотоэдс противоположного знака. Измеряемый на контактах сигнал является алгебраической суммой эдс, возникающих в слоях, прилегающих к пленке и подложке. Относительное увеличение поглощения света в GaAs приводит к смене знака фотоэдс и после достижения максимума на λ_2 к резкому падению амплитуды спектральной характеристики, что соответствует переходу через энергетический край поглощения GaAs. После этого электроно-дырочные пары генерируются в пленке германия и в переходном слое, вследствие чего наблюдается фотоэдс с максимумом амплитуды на λ_3 того же знака, что и максимум на λ_1 . Нужно отметить, что ось Y проведена на рисунке посередине толщины переходного слоя для удобства качественного описания предлагаемой модели и может отражать положение поверхности подложки GaAs перед процессом выращивания пленки германия, поскольку твердый раствор возникает как в подложке, так и в пленке. Совпадение середины переходного слоя и оси Y на рис. 3 с первоначальным положением поверхности подложки необязательно, так как коэффициенты диффузии и растворимость галлия, мышьяка и германия зависят от температуры и скорости выращивания гетероструктуры.

Следует обратить внимание на еще одну особенность анализируемой спектральной характеристики — это острый максимум эдс λ_2 , соответствующий поглощению в GaAs. Такая его форма объясняется тем, что пленка германия является по сути фильтром, поглощающим большую часть квантов света, что приводит к своеобразному «прижатия» коротковолновой части спектра фотоэдс к области края поглощения света GaAs.

4в. Важной особенностью интегральной характеристики фотоэдс в структуре Ge-GaAs является немонотонная зависимость амплитуды сигнала от интенсивности падающего света. На опыте эта зависимость изучалась следующим образом. На поверхность исследуемого образца со стороны пленки германия, кроме модулированного монохроматического излучения, направлялся с помощью зеркала пучок немодулированного излучения лампы накаливания. С помощью регулировки

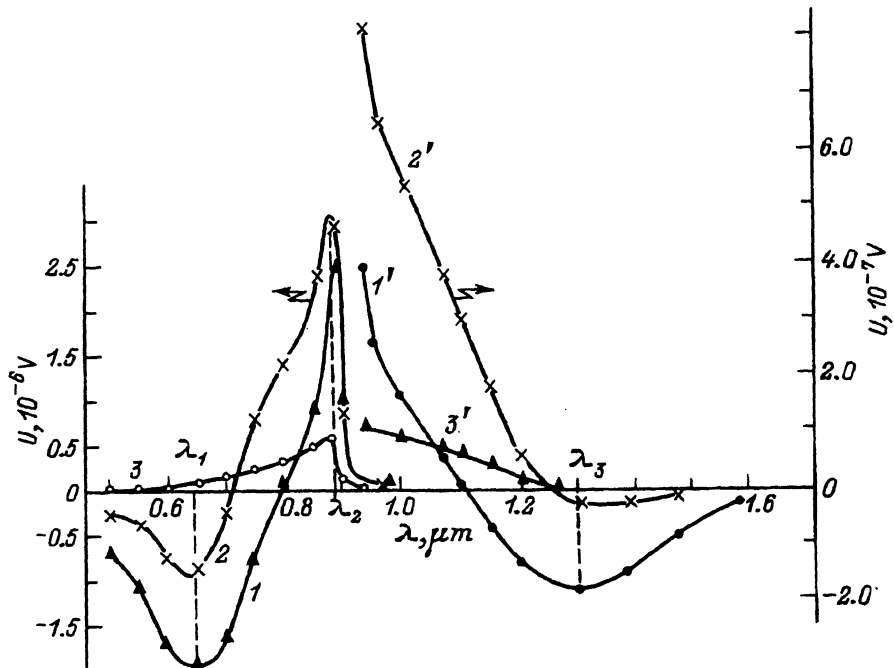


Рис. 4. Спектральные характеристики поперечной фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре Ge-GaAs при разных уровнях подсветки G_{\pm} , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$: 1, 1' — 0; 2, 2' — $1.1 \cdot 10^{15}$; 3, 3' — $4.9 \cdot 10^{16}$. Интенсивность потока квантов модулированного света G_{\sim} , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$: (1-3) — $1.0 \cdot 10^{14}$, (1'-3') — $8.5 \cdot 10^{14}$.

накала лампы изменялась интенсивность, а с помощью стеклянного фильтра — выделялся определенный спектральный состав излучения.

Зависимость вида спектральной характеристики от величины подсветки характеризуется семейством кривых 1-3 и 1'-3' на рис. 4. Подсветка осуществлялась через стеклянный фильтр ИКС-7 с полосой пропускания в области $1.0 \div 3.0$ мкм. Кривая 1 — это спектральная характеристика, измеренная в отсутствие подсветки. Видно, что наличие подсветки (кривая 2) приводит к возрастанию амплитуды фотоэдс. Особенно отчетливо это проявляется в области максимумов. При дальнейшем увеличении интенсивности подсветки происходит уменьшение амплитуды фотоэдс (кривая 3).

Интерпретацию этих экспериментальных результатов можно дать в рамках представлений о наличии потенциальных барьеров в структуре Ge-GaAs [3,8,9].

Как известно, наличие примесей в полупроводнике приводит к искривлению дна зоны проводимости и, соответственно, потолка валентной зоны. Такого рода неоднородная «модуляция» потенциального рельефа однородного полупроводника возникает как при различной степени легирования, так и при разной степени компенсации легирующей примеси [10,11]. Представив это рельеф в виде чередования «хребтов» и «перевалов» между ними, т.е. максимумов и минимумов потенциала, можно объяснить немонокотное изменение амплитуды фотоэдс. Прежде всего, наличие барьеров как в объеме, так и на поверх-

ности полупроводника приводит к тому, что генерированные светом электронно-дырочные пары пространственно разделяются, при этом электроны переходят в области минимумов в зоне проводимости, а дырки — в области максимумов в валентной зоне. Таким образом, время жизни квазиравновесных носителей заряда возрастает, так как теперь для рекомбинации носители должны преодолеть рекомбинационный барьер, который по величине может быть сравним с полушириной запрещенной зоны при высокой степени компенсации полупроводника. Оценки показывают [12], что носители действительно являются квазиравновесными, т.е. время их термализации на несколько порядков меньше времени, за которое происходит процесс пространственного разделения электронов и дырок на барьере. Ясно, что носители, скатываясь в области «перевалов» (дрейфовых барьеров), будут скапливаться в этих областях и понижать их потенциал, увеличивая тем самым проводимость образца. Дальнейшее увеличение концентрации генерированных светом носителей заряда приведет вслед за уменьшением дрейфовых барьеров к уменьшению высоты «хребтов» (рекомбинационных барьеров). Большое число электронно-дырочных пар теперь смогут прорекомбинировать, и фотопроводимость полупроводника начнет уменьшаться.

Представление о дрейфовых и рекомбинационных барьерах в гетероструктуре Ge-GaAs дает возможность объяснить немонотонный характер изменения амплитуды фотоэдс в зависимости от интенсивности подсветки G_{\pm} . Подсветка приводит к уменьшению в первую очередь дрейфовых барьеров и, следовательно, к увеличению эдс (рис. 4, кривая 2). Причем, как указывалось выше, такое увеличение наблюдается как в том случае, когда модулированный свет поглощается в основном в пленке германия, так и в случае поглощения света в области, прилегающей к подложке GaAs, что свидетельствует о наличии барьеров и в слое германия, и в переходном слое. Дальнейшее увеличение интенсивности подсветки приводит к уменьшению величины фотоэдс (рис. 4, кривые 3 и 3'), и это свидетельствует об уменьшении высоты рекомбинационных барьеров. Следует заметить, что из-за малой амплитуды фотоэдс спектральные характеристики в диапазоне $1.0 \div 1.7$ мкм измерялись при повышенной почти в 10 раз интенсивности модулированного света. Это обстоятельство привело даже в отсутствие подсветки к снижению высоты дрейфовых барьеров и, возможно, к частичному уменьшению рекомбинационных барьеров. На опыте это реализовалось отсутствием немонотонной зависимости амплитуды максимума λ_3 от интенсивности подсветки (рис. 4, кривые 1'–3').

В рамках барьерной модели легко понять природу фотоэдс, зависящей от направления движения зонда (рис. 2, а, кривые 2 и 3). При движении зонда в ранее освещенной им части образца возникает остаточная медленно релаксирующая концентрация генерированных светом носителей заряда, разделенных барьером, которая, естественно, больше, чем концентрация носителей в области образца, расположенной впереди движущегося зонда (рис. 2, б). Эта разность концентраций и приводит к возникновению эдс. Аналогичная фотоэдс ранее наблюдалась на неоднородности приповерхностного изгиба зон в кремнии [13]. Такая фотоэдс возникает в случае, если скорость движения зонда такова, что неравновесные носители не успевают рекомбинировать прежде, чем зонд переместится из этой области, т.е., другими слова-

ми, величина эдс зависит от скорости движения зонда. При изменении направления движения зонда на противоположный, знак эдс также изменится на противоположный и ее амплитуда будет складываться с амплитудой объемноградиентной фотоэдс или вычитаться из нее в зависимости от направления движения светового зонда, что и наблюдается в эксперименте.

5. Исследование характерных особенностей спектральных характеристик фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре Ge-GaAs позволяет сделать ряд важных выводов.

Прежде всего, эта структура обладает неоднородностью удельного сопротивления как вдоль границы раздела, так и в направлении роста пленки. Между пленкой и подложкой существует переходный слой с изменяющейся толщиной, который включает в себя твердый раствор $Ge_x(GaAs)_{1-x}$ с переменной шириной запрещенной зоны и произвольным значением x . В пленках германия толщиной 0.1÷0.2 мкм характерные линейные размеры переходного слоя и неоднородности удельного сопротивления сравнимы между собой и с толщиной самой пленки.

Кроме того, в гетероэпитаксиальной структуре Ge-GaAs существует неоднородная система дрейфовых и рекомбинационных барьеров, которые характерны для полупроводников с большим количеством примесей.

Вид спектральных характеристик поперечной фотоэдс дает возможность выяснить макро- и микроструктуру пленки германия и переходного слоя и таким образом прогнозировать электрофизические свойства.

Авторы выражают искреннюю признательность Б.К.Сердеге и А.Г.Кундзичу за плодотворные дискуссии.

Список литературы

- [1] E.J. Davey. Appl Phys. Lett., **8**, 164 (1966).
- [2] Н.П. Гарбар, Л.А. Матвеева, В.Ф. Митин, Ю.А. Тхорик, Р. Харман, Ю.М. Шварц, З. Шроубек. ФТП, **21**, 393 (1987).
- [3] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников*. (М., 1973).
- [4] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках*. (М., 1972).
- [5] Я. Тауц. *Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках*. (М., 1962).
- [6] Ж.И. Алферов, М.З. Жингарев, С.Г. Конников, И.И. Мокан, В.П. Улин, В.Е. Уманский, Б.С. Явич. **16**, 831 (1982).
- [7] D.E. Aspnes, A.A. Studna. Phys. Rev. B., **27**, 985 (1983).
- [8] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).
- [9] В.Б. Сандомирский, А.Г. Ждан, М.М. Мессерер, И.Б. Гуляев. ФТП, **7**, 1312 (1973).
- [10] Ю.Я. Ткач. ЖЭТФ, **101**, 203 (1992).
- [11] Ю.Я. Ткач, Е.В. Ченский. ЖЭТФ, **102**, 1683 (1992).
- [12] Ю.Я. Ткач. ФТП, **9**, 1071 (1975).
- [13] И.П. Жадько, А.Д. Кучерук, В.А. Романов, Б.К. Сердега, Л.В. Шеховцов. УФЖ, **27**, 622 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Transverse photovoltage in a Ge-GaAs heteroepitaxial structure

L.V.Shekhovtsov, A.V.Sachenko, Yu.M.Shvartz

Semiconductor Institute, Ukrainian Academy of Sciences, 252650, Kiev, the Ukraine

In the case of a Ge-GaAs heteroepitaxial structure the transverse photovoltage has been investigated experimentally at $T = 300$ K. Its spectral characteristics indicate that there is a transition layer between Ge film and GaAs substrate. A nonmonotonic dependence of the photovoltage amplitude on an additional illumination is connected with a system of «drift» and «recombination» barriers in the heterostructure bulk. A model for the band structure is proposed: «the film — transition layer with a variable gap — substrate».
