

ИЗМЕРЕНИЕ ВАХ InGaAs ПРИ ПОМОЩИ ПИКОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ СТРОБИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Балинас В., Гореленок А. Т., Кроткус А., Сталненис А., Шмидт Н. М.

При помощи метода электрооптического стробирования измерены вольтамперные характеристики слоев InGaAs в диапазоне электрических полей, в 10 раз превышающих порог отрицательной дифференциальной проводимости. Большая разрешающая способность экспериментальной установки позволила измерить время формирования ганновских доменов, а также определить зависимость дрейфовой скорости электронов v_d от напряженности электрического поля в условиях однородного распределения электрического поля в образце. Экспериментальные результаты сопоставлены с расчетами методом Монте-Карло.

Введение. Зависимость дрейфовой скорости носителей тока от напряженности электрического поля $v(E)$ является одной из важнейших характеристик полупроводниковых материалов, без знания которой невозможно ни понять закономерности движения электронов и дырок в полупроводниковых структурах, ни определить оптимальные режимы работы большинства новых приборов. Дрейфовая скорость электронов в полупроводниках изучалась в целом ряде экспериментальных работ, обстоятельный обзор которых был представлен в книге Даргиса [1].

В сравнительно слабом электрическом поле зависимость $v(E)$ можно определить из простых измерений вольтамперных характеристик (ВАХ) образца, используя соотношение

$$j = en_0v(E_0), \quad (1)$$

где j — плотность тока, e — элементарный заряд, n_0 — равновесная концентрация электронов. При этом предполагается, что как n_0 , так и напряженность электрического поля E_0 остаются постоянными и однородными вдоль образца по мере увеличения электрического поля. В сильных электрических полях, однако, такие предположения становятся неправомерными. В большинстве полупроводников дрейфовая скорость электронов в сильных полях либо стремится к насыщению, либо уменьшается с ростом электрического поля [эффект отрицательной дифференциальной подвижности (ОДП)]. Это приводит к расслоению в распределении электрических зарядов по длине образцов, к образованию движущихся доменов сильного поля, и соотношение (1) перестает быть справедливым.

Для определения вида зависимости $v(E)$ в этой области полей часто используется метод времени—пролета [2], в котором измеряется длительность токовых импульсов, индуцируемых во внешней цепи в результате движения вдоль образца пакета инжектированных извне носителей. Однако для проведения таких измерений необходимы образцы с малыми концентрациями равновесных носителей тока, получение которых невозможно для ряда новых полупроводниковых материалов и структур. Определение дрейфовой скорости электронов в низкоомных образцах возможно лишь по измерениям их электропроводности в сильных электрических полях. При этом для исключения влияния формирующихся сильнополевых доменов либо используется разогрев электронов СВЧ полем [3], либо применяются импульсы, длительность которых меньше времени образования доменов τ_d [4]. В отличие от первого из указанных методов, в кото-

ром измеряются усредненные по широкому интервалу электрических полей значения электропроводности образцов, импульсная методика позволяет проводить прямое определение зависимости $\nu(E)$ с использованием выражения (1). Главная сложность здесь заключается в необходимости экспериментального оборуования с очень высоким временным разрешением, так как времена формирования доменов сильного поля являются величинами порядка 100 пс [4].

Проведение импульсных измерений ВАХ с таким большим временным разрешением стало возможным лишь после создания установок, использующих сверхкороткие импульсы, генерируемые лазерами. Используя установку с оптоэлектронным стробированием сверхкоротких электрических импульсов, имевшую временное разрешение порядка 25 пс, измерили зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в узкозонных InSb и InAs [4] и эпитаксиальных слоях четверных соединений InGaAsP [5].

В настоящей работе описано устройство с еще более высоким временным разрешением, лучшим, чем 10 пс. В данном устройстве использовано электрооптическое стробирование электрических сигналов. При его помощи измерены импульсные ВАХ в эпитаксиальных слоях InGaAs. Определены времена формирования доменов и вид зависимости $\nu(E)$ в диапазоне электрических полей, в несколько раз превышающем пороговое поле ОДП в данном материале.

1. М е т о д и к а и з м е р е н и й

Принцип электрооптического стробирования, впервые примененного для измерения формы сверхкоротких электрических перепадов Валдманисом [6], заключается в том, что исследуемый сигнал распространяется по высокочастотной передающей линии, изготовленной на подложке из кристалла, обладающего линейным электрооптическим эффектом или эффектом Погкельса, и индуцирует двулучепреломление этого кристалла. В результате этого происходит изменение поляризации светового импульса, просвечивающего электрооптический модулятор в направлении, перпендикулярном распространению электрического импульса, и это изменение пропорционально амплитуде электрического поля в модуляторе в момент взаимодействия электрического и оптического сигналов. Поэтому, изменяя время задержки между этими сигналами и измеряя соответствующие изменения поляризации стробирующего оптического импульса, можно определить форму исследуемого электрического импульса. Поскольку электрооптический эффект устанавливается за времена порядка фемтосекунд [6], временное разрешение данного метода практически ограничивается лишь длительностью используемых лазерных импульсов.

Так как изменения поляризации стробирующих световых импульсов являются малыми, в электрооптических системах необходимо использовать лазеры, энергия и пространственная структура импульсов которых стабильны во времени. Поэтому в описанных в литературе установках использовались лишь лазеры на красителях [6, 7] и твердотельные лазеры с активной синхронизацией мод [8]. Однако обоим указанным типам лазеров свойственны сравнительно малые энергии световых импульсов, поэтому их невозможно использовать для запуска оптоэлектронных генераторов мощных электрических импульсов, необходимых для исследований ВАХ в сильных электрических полях. Для данной цели наиболее пригодны пикосекундные твердотельные лазеры с пассивной синхронизацией мод [4]. Главным препятствием использования таких лазеров для электрооптического стробирования является значительная флуктуация энергии генерируемых ими световых импульсов.

В настоящей работе в установке для измерения ВАХ полупроводников в сильных электрических полях был использован лазер с пассивной синхронизацией мод на основе кристалла алюмината иттрия, легированного ионами неодима. Для стабилизации энергии световых импульсов в лазере использована схема управления добротностью резонатора, в общих чертах схожая с предложенной в работе [9]. Электрооптическая установка на основе данного лазера была предварительно использована нами для измерения времен релаксации фотопроводимости, меньших чем 10 пс, в магнитных полупроводниках [10]. Импульсы лазера имели следующие параметры: частота следования импульсов

была 25 Гц, а длина волны излучения, длительность на полуширине и энергия одиночного импульса были равны для импульсов основной и второй гармоник излучения соответственно $\lambda_1=1.079$ мкм, $\Delta t_1=10$ пс, $\varepsilon_1=100$ мкДж; $\lambda_2=0.539$ мкм, $\Delta t_2=7$ пс, $\varepsilon_2=10$ мкДж.

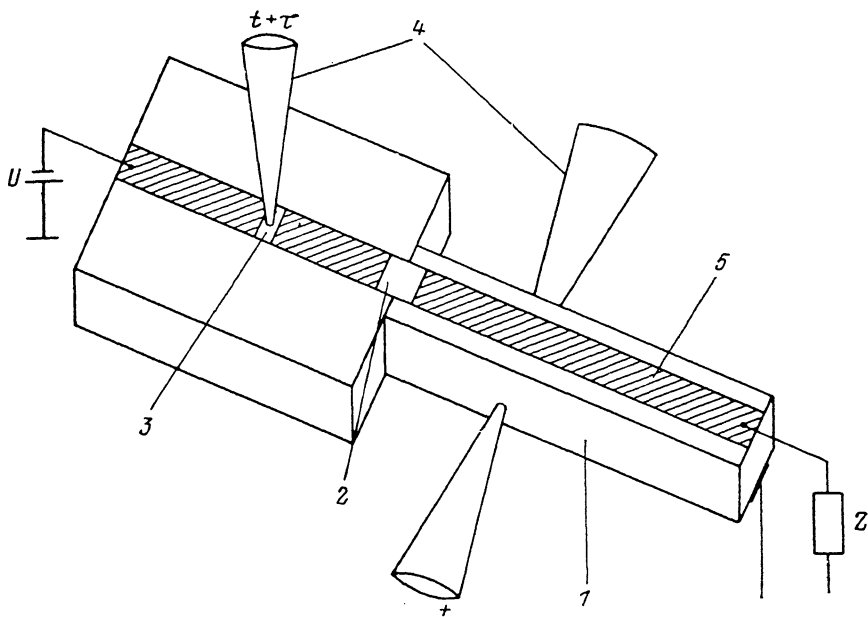


Рис. 1. Общий вид высокочастотного электрооптического модулятора.

1 — модулятор из LiTaO_3 , 2 — образец, 3 — оптоэлектронный затвор, 4 — лазерный луч, 5 — металлический проводник.

Высокочастотный электрооптический модулятор, использованный в настоящей работе, изображен на рис. 1. Он представляет собой отрезок балансной полосковой линии, изготовленной на подложке из LiTaO_3 . Исследуемый образец крепился на стыке между модулятором и отрезком обычной микрополосковой линии на полкоровой подложке. На щели в верхнем проводнике микрополосковой линии крепился оптоэлектронный затвор из высокоомного кремния, который служил для генерации коротких электрических импульсов. Питание оптоэлектронного затвора осуществлялось импульсами длительностью 300 нс и амплитудой до 300 В. Для запуска оптоэлектронного генератора пикосекунд-

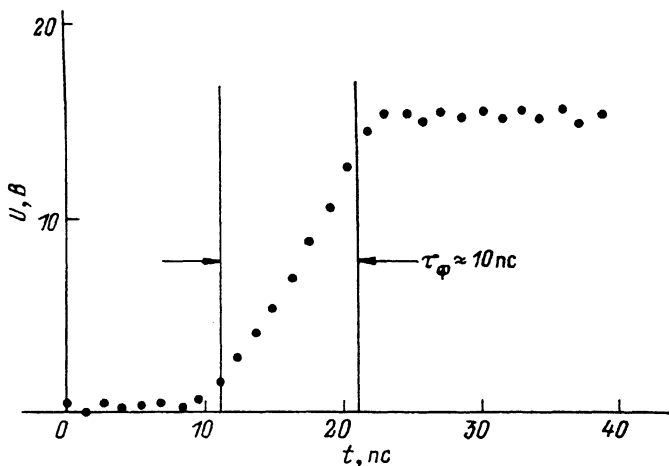


Рис. 2. Передний фронт электрического импульса, генерируемого при помощи оптоэлектронного затвора.

ской линии на полкоровой подложке. На щели в верхнем проводнике микрополосковой линии крепился оптоэлектронный затвор из высокоомного кремния, который служил для генерации коротких электрических импульсов. Питание оптоэлектронного затвора осуществлялось импульсами длительностью 300 нс и амплитудой до 300 В. Для запуска оптоэлектронного генератора пикосекунд-

ных электрических импульсов и для их стробирования использовались более короткие импульсы второй гармоники излучения лазера. Изменение поляризации стробирующего светового импульса фиксировалось при помощи узкополосного дифференциального фотодетектора. Время задержки между электрическим и стробирующим оптическим импульсами устанавливалось при помощи оптической линии задержки, длина которой изменялась при помощи шагового двигателя. Измерения в каждой точке усреднялись по 100 вспышкам лазера, эксперимент управлялся при помощи микро-ЭВМ «Электроника-60».

На рис. 2 показана форма электрического импульса, падающего на образец, измеренная при помощи электрооптического стробирования. Полученное значение времени нарастания импульса равно 10 пс, что соответствует ожидаемому временному разрешению устройства. Полученная чувствительность измерения напряжения на электрооптическом модуляторе была равной 100 мВ.

Исследовались образцы, изготовленные из слоев $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенных на подложках InP при помощи жидкофазной эпитаксии по методике легирования раствора-расплава редкоземельными элементами [11]. Импульсные ВАХ измерялись на двух образцах, имеющих при комнатной температуре концентрации электронов и их подвижности, равные соответственно $2.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $8500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (образец А) и $9.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $10 \cdot 100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (образец В). Толщина слоев равна 5.6 мкм. Образцы имели копланарные омические контакты из сплава золото—германий, отожженные в атмосфере водорода при 400 °С. Ширина контактных площадок была равна 500 мкм, межконтактное расстояние — 55 мкм.

Все измерения проводились при комнатной температуре.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны импульсы тока, измеренные для образца А при различных величинах электрического поля. Передний фронт этих импульсов более длительный, чем у падающего на образец импульса, показанного на рис. 2. Это, а также выбросы в начале импульсов связаны с зарядкой паразитных емкостей (с геометрией образца и его монтажом).

Три токовых импульса на рис. 3 соответствуют трем различным областям на ВАХ образца. При электрическом поле, меньшем порога падающей части ВАХ (рис. 3, а), вершина импульсов тока является почти плоской, повторяющей форму падающего на образец импульса. Участок с ОДП начинается при среднем поле, равном $\sim 3 \text{ кВ/см}$ (рис. 3, б). При полях, превышающих это значение, ток через образец становится меньшим, чем в максимуме ВАХ. Это уменьшение происходит в два этапа. Уже с самого начала импульсов ток становится меньше, чем его значение в максимуме ВАХ. В этой части импульсов величина тока определяется дрейфовой скоростью электронов при соответствующей средней напряженности электрического поля в образце, согласно выражению (1). В дальнейшем ток в образце в связи с возникновением домена сильного поля уменьшается дополнительно до величины, соответствующей значению дрейфовой скорости электронов на падающем участке зависимости $v(E)$. Ступенчатое уменьшение тока, вызванное образованием домена, ярко проявляется на импульсе, представленном на рис. 3, в. Время формирования домена мало зависело от напряжения на образце и было примерно равным 150 пс, если считать от окончания первого выброса на токовом импульсе. Задержка в формировании домена при полях, близких к порогу ОДП, которая видна на рис. 3, б, связана с некоторым ростом напряжения в плоской части питающих образец импульсов.

В [12] было показано, что в процессе формирования напряжения на домене U_d растет во времени t по закону

$$U_d/U_{d0} = (\exp(t/\tau_0) - 1) / (\exp(t/\tau_0) + 1), \quad (2)$$

где U_{d0} — напряжение, падающее на полностью сформированном домене, а τ_0 — характерная временная постоянная процесса. При этом напряжение на домене набирает 90 % от своего стационарного значения за время, равное $3.5 \tau_0$, а электрическое поле в образце остается близким к однородному в течение времени τ_0 , когда напряжение на домене еще составляет менее 10 % от U_{d0} .

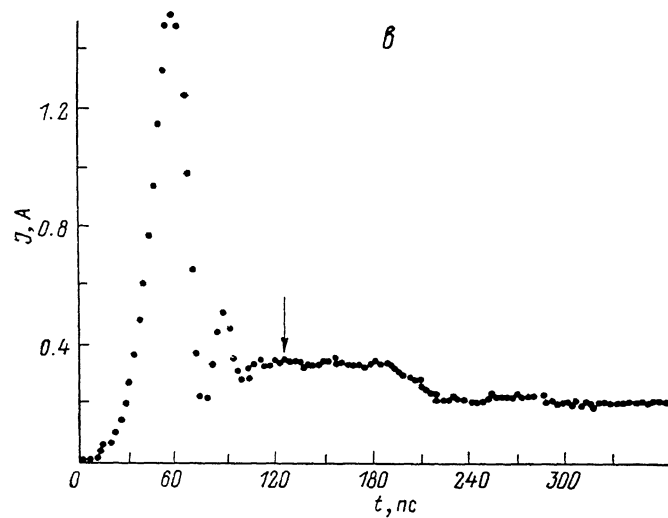
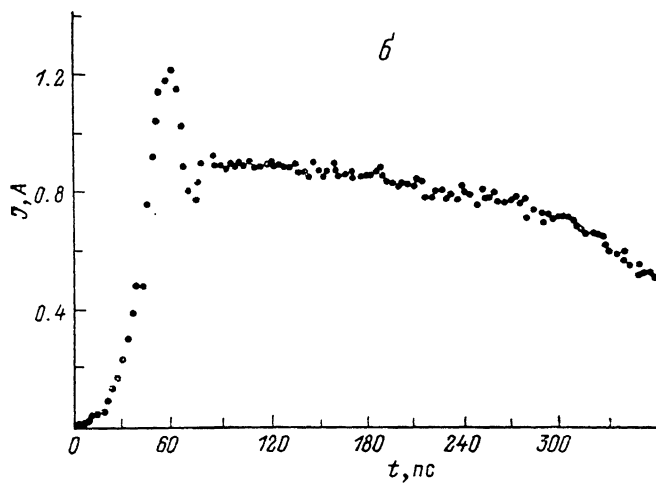
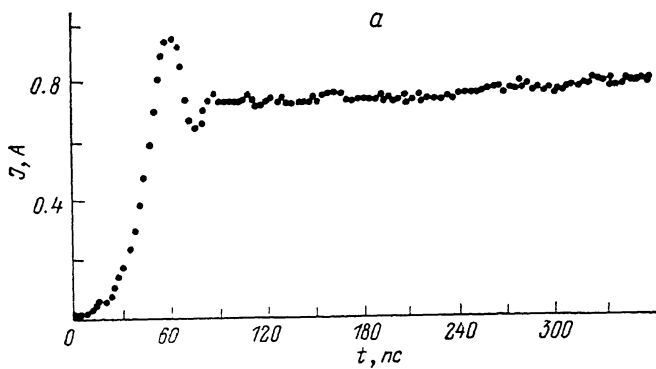


Рис. 3. Импульсы тока при различной напряженности электрического поля в образце А. E , кВ/см: а — 2.7, б — 2.95, в — 12.5. Стрелкой указан момент времени, при котором измерялись ВАХ.

Если по виду токовых импульсов в полях за порогом ОДП считать, что полное время формирования равно $3.5 \tau_0 = 150$ пс, то из этого следует, что определение зависимости $v(E)$ по измерениям импульсов тока в сильных электрических полях возможно для данного образца в течение времени, меньшего $\tau_0 = 42$ пс от начала импульсов.

Время формирования доменов сильного поля увеличивается при уменьшении уровня легирования образца. Поэтому для образца *Б*, имевшего меньшую, чем в образце *А*, концентрацию электронов, мы не наблюдали падения амплитуды тока, связанного с образованием домена за весь импульс, длительность которого составляла 250 пс.

Для определения вида зависимости $v(E)$ в $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ измерения ВАХ проводились через 30 пс после того, как на образце устанавливалось сильное электрическое поле (отмечено стрелкой на рис. 3), что, согласно вышеизложен-

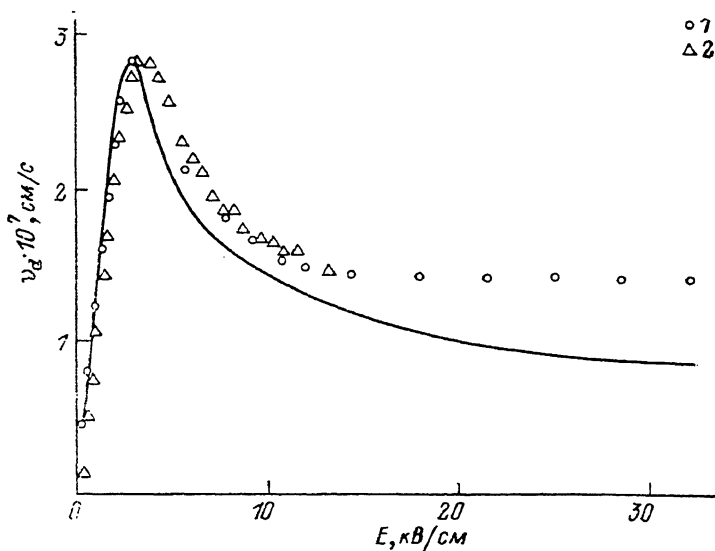


Рис. 4. Зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля.

Эксперимент: 1 — для образца *А*; 2 — для образца *Б*; сплошная кривая — расчет методом Монте-Карло [11].

ному, должно было обеспечить однородность электрического поля по длине образцов во всем диапазоне напряжений. Результаты таких измерений показаны на рис. 4. Значения напряженности электрического поля, отложенные по оси абсцисс, определялись делением напряжения на образце на его длину, а дрейфовые скорости электронов рассчитывались с использованием соотношения (1). На этом же рисунке отложена также зависимость $v(E)$ для электронов в $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, рассчитанная методом Монте-Карло в работе [12]. Как видно из рисунка, теория и эксперимент хорошо согласуются в области допороговых электрических полей. Кроме того, расчет хорошо описывает экспериментальные значения порогового поля ОДП и максимальной дрейфовой скорости электронов. В области же электрических полей, превышающих порог ОДП, измеренные значения дрейфовых скоростей больше расчетных.

Рассмотрим причины, которые могут обусловить наблюдаемое разногласие теории и эксперимента. В [1] было показано, что в начальной стадии формирования сильнополевых доменов, когда существует лишь аккумуляционный слой, а обедненный слой еще не образовался, в образце течет ток смещения, вызванный перемещением электрического заряда, накопленного в аккумуляционном слое. Рост объемного заряда в аккумуляционном слое происходит с временной постоянной, равной дифференциальному времени диэлектрической релаксации в области ОДП. Это время, рассчитанное по экспериментальным зависимостям, равно 7 пс для образца *Б* и 2.5 пс для образца *А*. Поэтому через 30 пс от начала импульсов в момент времени, когда производилось измерение ВАХ, уже можно

ожидать, что наличие тока смещения, вызванного движением по образцу обогащенного слоя, приведет к некоторому завышению определяемого значения дрейфовой скорости. Однако влияние тока смещения должно быть значительно больше для измерений, проведенных на образце А с большей концентрацией электронов, что противоречит результатам наших измерений. Поэтому вопрос об истинном виде зависимости $v(E)$ в InGaAs в сильных электрических полях остается пока полностью не решенным. Для его решения необходимо, с одной стороны, провести численное моделирование условий, соответствующих экспериментальной ситуации, а с другой стороны, подробно проанализировать все механизмы рассеяния электронов в данном материале в сильных электрических полях, тем более что такие важнейшие параметры этих механизмов, как величина междолинного расстояния в зоне проводимости и потенциал рассеяния на расплаве в $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, остаются пока неопределенными.

Авторы признательны Д. Н. Рехвиашвили за помощь в изготовлении образцов.

Список литературы

- [1] Даргис А. Измерение дрейфовой скорости в твердых телах. Моклас, Вильнюс, 1987. 203 с.
- [2] Reggiani L. // Proc. NATO Adv. study Inst. Phys. Nonlinear Electr. Transp. Urbino. N. Y.—London, 1980. P. 243—254.
- [3] Masselink W. T. // Semicond. Sci. Techn. 1989. V. 4. N 6. P. 503—505.
- [4] Dobrovolskis Z., Grigoras R., Krotkus A. // Appl. Phys. A. 1989. V. 48. N 3. P. 235—249.
- [5] Гальванаускас А., Гореленок А. Т., Добровольскис Э., Кершулис С., Пожела Ю., Реклайтис А., Шмидт Н. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 9. С. 1672—1677.
- [6] Valdmanis J. Thesis submitted for the Degree Doctor of Philosophy Rochester. N. Y., 1983.
- [7] Valdmanis J., Mourou C. // IEEE J. Quant. Electron. 1986. V. 22. N 1. P. 69—78.
- [8] Weingarten K. J., Rodwell M. J. W., Bloom D. M. // IEEE J. Quant. Electron. 1988. V. 24. N 2. P. 198—220.
- [9] Валшин А. М., Гордиенко В. М., Краюшкин С. В., Платоненко В. Т., Попов В. К. // Квант. электрон. 1986. Т. 13. В. 8. С. 1713—1715.
- [10] Балинас В., Галдикас А., Кроткус А., Сталенис А., Аминов Т. Г. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1859—1863.
- [11] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Гацов К. А., Гореленок А. Т., Каманин А. В., Мамутин В. В., Пушный Б. В., Тибилов В. К., Толпаров Ю. П., Шубин А. Е. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 83—85.
- [12] Ahmed S. R., Nag B. R., Deb Roy M. // Sol. St. Electron. 1985. V. 28. N 12. P. 1193—1197.

Институт физики полупроводников АН ЛитССР
Вильнюс

Получена 18.12.1989
Принята к печати 2.01.1990