

ЭЛЕКТРОННАЯ 2D—3D-СИСТЕМА — КВАНТОВЫЙ ДИОД. I. ОБЩИЕ СВОЙСТВА

Кадушкин В. Н., Фомичев С. И.

Экспериментально исследована стационарная ЭДС, возникающая в системе вырожденных 2D—3D-электронов при возбуждении внешним переменным электрическим полем. Обращено внимание на то, что эта ЭДС имеет два компонента, один из которых уже имеется в отсутствие магнитного поля, а второй имеет осциллирующую зависимость от магнитного поля. Показано, что последний по природе одинаков с осцилляциями поперечного магнитосопротивления. Изучено влияние на стационарную ЭДС величины возбуждаемого сигнала и частоты (до 400 МГц). Измерения амплитудных характеристик эффекта обнаружили их пороговый характер. Совокупность данных позволила сделать вывод, что эффект обусловлен детектированием внешнего сигнала барьерным слоем в системе вырожденных 2D—3D-электронов. Наблюдаемые явления можно объяснить нелинейностью и асимметрией ВАХ двойной диодной системы, образованной объемными и двумерными электронами.

На плато холловского компонента ρ_{xy} тензора поперечного магнитосопротивления (МС) в режиме квантования были обнаружены аномальные пики [1]. Это явление в дальнейшем было исследовано более подробно в работах [2—5] и классифицировано как квантовые «нулевые» осцилляции (НО). Суть явлений состоит в возникновении стационарной ЭДС \bar{V} , осциллирующей в магнитном поле B на контактах к образцу с двумерным электронным газом в отсутствие тока («тянущего» поля) внешнего источника. Эти НО проявляются также и в измерениях компонентов ρ_{xx} и ρ_{xy} тензора поперечного МС при небольших уровнях измеряемого сигнала.

Две точки зрения существуют на природу НО. Согласно [4], LC-фильтры не влияют на эффект НО, а лишь улучшают шумовые характеристики измерительной схемы. Источник ЭДС НО усматривается в наводке от нестационарности (затухания) магнитного поля соленооида или излучения от низкотемпературного окружения образца. Причину осцилляционного поведения ЭДС НО в магнитном поле авторы [4] связывают со специфической структурой электронной 2D-системы. В работе [5] установлено, что применением RC-фильтров полностью подавляется эффект НО. Эти эксперименты делают разумным предположение о том, что источник генерируемой ЭДС НО — это детектируемая системой 2D—3D-электронов наводка от внешних частей измерительной цепи, находящихся при комнатной температуре. Помимо указанного противоречия в оценке роли внешней наводки как источника мощности при формировании ЭДС НО \bar{V} , отсутствия удовлетворительного механизма из возникновения, обращают на себя внимание следующие обстоятельства. Прежде всего это наличие двух компонентов в ЭДС \bar{V} , первый из которых \bar{V}_0 уже имеется в условиях $B = 0$ и который различным образом зависит от магнитного поля. Второй компонент \bar{V}_B имеет осциллирующую зависимость от магнитного поля.

В связи с отмеченным нами выполнены исследования стационарной ЭДС \bar{V} , инициированной внешними электромагнитными полями (включая и НО) при

гелиевых температурах на серии гетеросистем $n\text{-AlGa}_{1-x}\text{As/GaAs}$ с $x \approx 0.28 + 0.30$, выращенных методом эпитаксии из молекулярных пучков.

Измерения свойств ЭДС \bar{V} в условиях неконтролируемого «белого» шума (внешняя наводка) и искусственного сигнала \bar{V} , фиксированной амплитуды и частоты позволили интерпретировать наблюдаемые явления в представлении диодной теории контакта вырожденных $2D-3D$ -электронов [6].

Техника и методика эксперимента

Экспериментальному исследованию подвергнуты образцы в геометрии Вандер-Пау, одинарного и двойного холловского моста. Данные о параметрах образцов приведены в таблице. Магнитное поле возбуждалось сверхпроводящим соленоидом с индукцией 7.4 Т, однородностью не хуже $6.6 \cdot 10^{-4}$ Т/мм и временным дрейфом 10^{-4} Т/ч. Температурный режим образца контролировался термопарой FeCu—Cu

Параметры исследованных образцов
 $n\text{-AlGa}_{1-x}\text{As/GaAs}$

№ образца	$n_s, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$\mu, 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
1	6.70	0.40
2	7.10	1.05
3	6.00	1.50
4	6.30	1.68
5	3.46	2.13

с чувствительностью 0.1 К и стабильностью не хуже 0.5 К/ч. Контакты к образцам изготовлялись напылением индия или Ge—Au-эвтетикой с последующим вжиганием в вакууме или атмосфере водорода при температуре 400—450 °С в течение нескольких секунд. Образцы юстировались до 30'' по нормали к вектору индукции магнитного поля. Все измерения выполнялись в записи на двухкоординатном самописце Н307.

Основные особенности общего характера ЭДС \bar{V} были исследованы в условиях естественной наводки (белый шум). Включение в измерительную цепь на входе в металлический криостат RC-фильтра полностью подавляло нулевые осцилляции (параметры RC-цепочки: частота среза 77 Гц и затухание 20 дБ/дек). Однако неконтролируемая естественная наводка исключала измерение количественных характеристик ЭДС \bar{V} . Поэтому амплитудные $\bar{V}_{0,B}$ (V) и частотные $V_{0,B}$ (f) характеристики были измерены в условиях возбуждения образца переменным напряжением \bar{V} в широком диапазоне частот ($f < 400$ МГц). Естественно, что эти измерения выполнялись с одновременным экранированием измерительного тракта от белого шума.

Экспериментальные результаты и особенности

1. Измерения компонентов ρ_{xx} и ρ_{xy} тензора поперечного магнитосопротивления и зависимость $\bar{V}(B)$ представлены на рис. 1. Видны характерные особенности — наличие компонентов \bar{V}_0 и \bar{V}_B стационарной ЭДС. Причем зависимость монотонного компонента в $V_B^{\text{мон}}$ для структуры 4 обнаруживает сильную зависимость (со сменой знака) от магнитного поля. Прослеживается отчетливая асимметрия осцилляций $\bar{V}(B)$ относительно поперечного магнитосопротивления ρ_{xx} : совпадение положений минимумов осцилляций и смещение максимумов на кривых $\bar{V}(B)$ относительно осцилляций ρ_{xx} на область больших магнитных полей.

Измерения стационарной ЭДС на потенциальных (xx) и холловских (xy) контактах не выявили аномалий. Осцилляции \bar{V}_{xx} и \bar{V}_{xy} синфазны и близки по абсолютной величине. Вместе с этим наблюдалось явление смены фазы \bar{V}_B без изменения знака \bar{V}_0 .

2. Второй цикл измерений ЭДС \bar{V} был выполнен в условиях контролируемого возбуждающего сигнала \bar{V} . Из представленных на рис. 2 и 3 результатов экс-

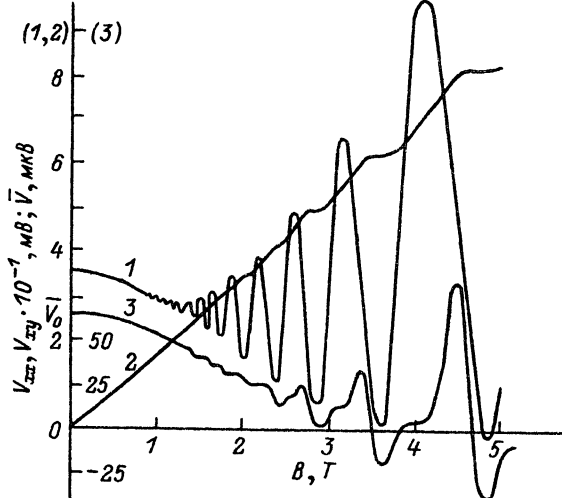


Рис. 1. Осцилляции компонент ρ_{xx} (1), ρ_{xy} (2) тензора поперечного магнитосопротивления и \bar{V} (3) в режиме КЭХ структуры 4 ($T = 4.2$ К).

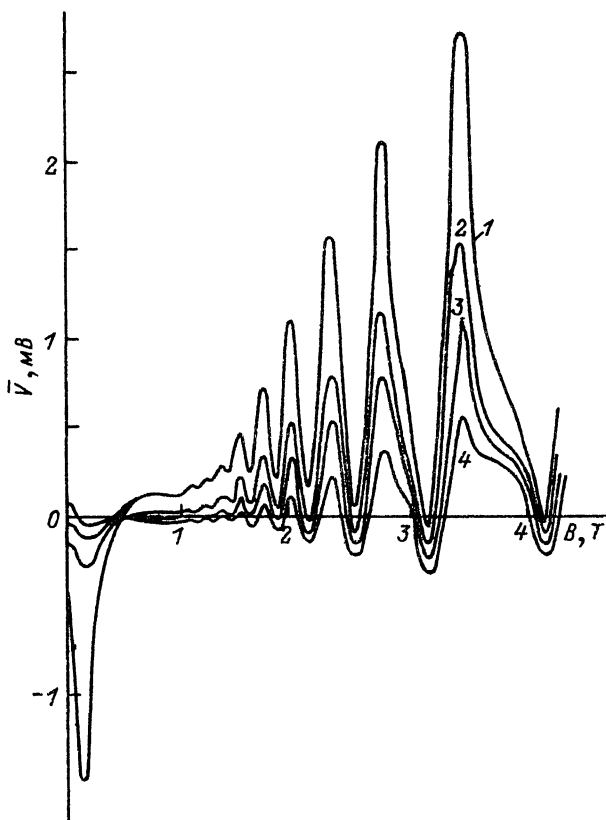


Рис. 2. Особенности осцилляций стационарной ЭДС \bar{V} на частоте $f = 129$ МГц при 4.2 К на примере структуры 3.

Ослабление \bar{V} , Дб: 1 — 0, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 10 ($\bar{V}_1 = 40$ мВ).

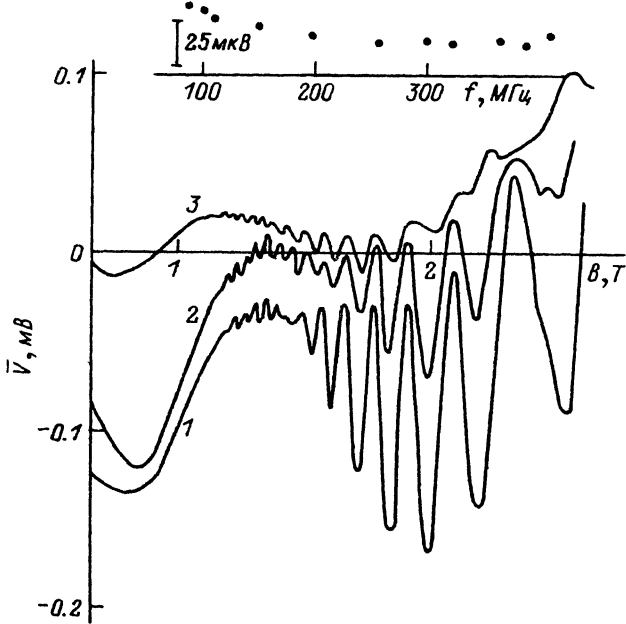


Рис. 3. Осцилляции \bar{V}_B при возбуждении образца переменным сигналом \bar{V} различной частоты. f , МГц: 1 — 25, 2 — 50, 3 — 400. Структура 3, $T = 4.2$ К.

периментов видно, что в широких пределах вариации величины \bar{V} и частоты f осцилляции \bar{V}_B сохраняют присущие им свойства. Хотя имеется качественное отличие в виде кривых \bar{V}_B по отношению к условиям белого шума, но сохраняются экспоненциальная зависимость амплитуды осцилляций $\delta(\bar{V}_B)$ от $1/B$ и одинаковая начальная фаза осцилляций ρ_{xx} и $\bar{V}(B)$: $\varphi = -0.3\pi$. Частотные характеристики $\bar{V}(f)$, измеренные в условиях $B = 0$ и в магнитном поле $B = \text{const}$, как и следовало ожидать, аномалий не обнаружили (см. вставку на рис. 3). Заметим, что частотные характеристики измерялись в режиме $\bar{V} = \text{const}$.

Наиболее интересный результат получен при исследовании амплитудных характеристик $\bar{V}(\bar{V})$ в условиях $B = 0$ и $B = \text{const}$. Основные результаты представлены на рис. 4. Здесь зависимости 1—2, 1—3, 1—4 получены на соответствующих парах контактов (см. вставку на рис. 4), а A—D — на контактах 1—4 в минимумах (A—C) и максимуме (D) осцилляций \bar{V}_B . Зависимости $\bar{V}_{0,B}(\bar{V})$ носят поро-

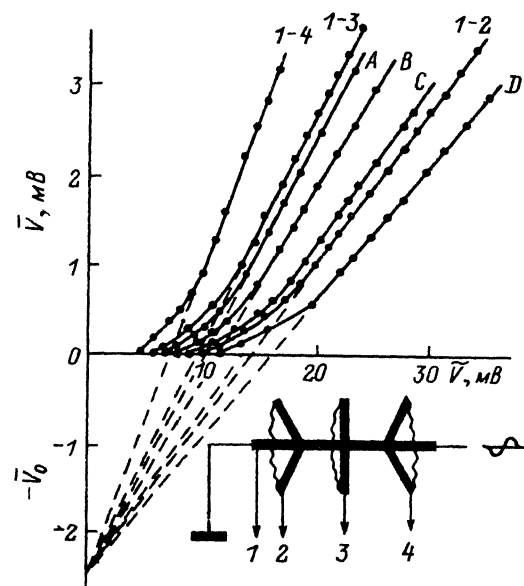


Рис. 4. Амплитудные характеристики стационарной ЭДС $\bar{V}(\bar{V})$ в отсутствие магнитного поля (1—4) и в магнитном поле (A—D).

B, T : A — 1.90, B — 2.38, C — 3.20, D — 3.74. Структура 3, $T = 4.2$ К, $f = 10^3$ Гц.

Рис. 5. Амплитудные характеристики $\bar{V}(\bar{V})$ структуры 5.

$E_y = 0$ (1^0-4^0), $E_y \neq 0$ (1^*-4^*) при $T = 4,2$ К на контактах 2-4 (см. вставку на рис. 4). B , Т: 1^0-0 , $2^0-2,30$, $3^0-2,84$, $4^0-3,75$; 1^*-0 , $2^*-2,17$, $3^*-2,72$ и $4^*-3,60$.

говый характер, а именно: во-первых, линейные участки зависимостей аппроксимируются условием $\bar{V} \rightarrow 0$ на порог \bar{V}_0 (величиной в несколько милливольт), и, во-вторых, имеет место напряжение отсечки $\bar{V} = \bar{V}_0$, при котором \bar{V} обращается в нуль.

Эффект преобразования $\bar{V}(\bar{V})$ имеет характер накопления в объеме структуры (наклон $\Delta\bar{V}/\Delta\bar{V}$ увеличивается пропорционально линейному размеру структуры). Причем магнитное поле уменьшает эффект преобразования: с увеличением B зависимости $\bar{V}_B(\bar{V})$ смещаются в область больших \bar{V} . Такое воздействие магнитного поля на амплитудную характеристику имеет место в измерениях $\bar{V}(\bar{V})$ в режиме как с замкнутыми ($E_y = 0$), так и с разомкнутыми ($E_y \neq 0$) холловскими контактами, что показано на рис. 5.

Таким образом, на зависимости $\bar{V}(\bar{V})$ имеется область, которую следует описать законом

$$\bar{V}_0 = -\bar{V}_0^* + a\bar{V},$$

где \bar{V}_0^* — пороговое значение V : $\bar{V}_0^* = \bar{V}(\bar{V} \rightarrow 0)$, a — некоторый параметр. Пороговое значение \bar{V} безотносительно к таким внешним факторам, как величина магнитного поля (рис. 4, кривые А—D), размеры образца (рис. 4, кривые 1, 2; 1—3; 1—4) и температура (см. далее). Изменение величины \bar{V}_0^* зафиксировано в опытах по измерению зависимости $\bar{V}_0(\bar{V})$ при постоянном смещении на образце (см. далее).

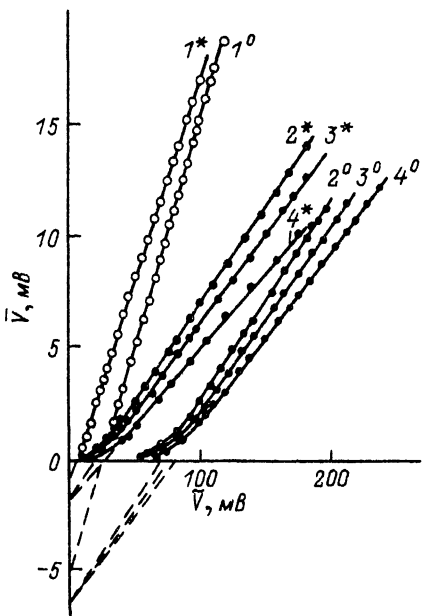
Существование порога \bar{V}_0^* является наиболее впечатляющим качеством эффекта, характеризующего проявление внутренней энергетической структуры электронной 2D—3D-системы.

Следует отметить напряжение отсечки \bar{V}_0 , при котором эффект преобразования $\Delta\bar{V}/\Delta\bar{V}$ исчезает.

3. Вся совокупность экспериментальных результатов, несомненно, свидетельствует в пользу того, что эффект выпрямления $\Delta\bar{V}/\Delta\bar{V}$ обусловлен контактом квантовой системы вырожденных 2D—3D-электронов.

Проблема контакта к электронным системам пониженной размерности (2D, 1D) исследована в [6]. Показано, что на границе раздела контакта систем вырожденных 2D—3D-электронов возникает потенциальный барьер с нелинейными свойствами. Следовательно, тестовый образец с токовыми (ТТ) и потенциальными (ПП) контактами можно представить в виде двух диодов, последовательно замкнутых встречно на сопротивление R^{\square} двумерного электронного газа. По токовым контактам из внешней цепи на такой «квантовый» диод¹ подается переменное напря-

¹ Термин «квантовый» диод для характеристики детектирующих свойств электронной 3D—2D-системы введен И. И. Сайдашевым.



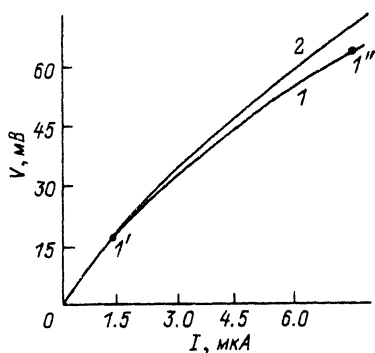


Рис. 6. Асимметричная нелинейная ВАХ структуры 5.

$T = 4.2$ К, 1 — прямая, 2 — обратная ветви.

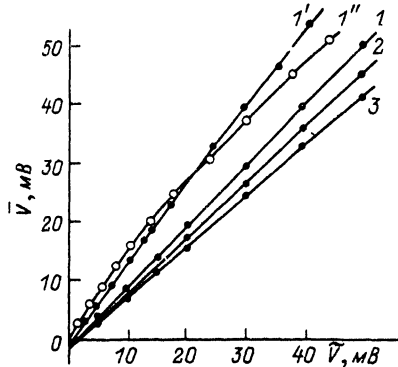


Рис. 7. Влияние температуры и постоянного смещения на амплитудные характеристики \bar{V}_0 (\bar{V}).

T , К: 1, 1' и 1'' — 4.2, 2 — 20, 3 — 30. V_0 , мВ: 1' — 15, 1'' — 67 (точки на кривой 1 рис. 6). $f = 10^3$ Гц, структура 5.

жение (естественная наводка типа белый шум или искусственный контролируемый сигнал \bar{V}). Стационарная ЭДС \bar{V} — это выпрямленное квантовым диодом напряжение (разность потенциалов), снимаемое с R^{\square} в измерительный тракт с потенциальных контактов. Эта ЭДС появляется за счет нелинейности и асимметрии обратных ветвей ВАХ квантового диода. Измерения вольт-амперной характеристики на постоянном токе выявили сильную нелинейность в зависимости $j(E)$ и достаточную асимметрию для направлений тока через образец «+» и «-» (рис. 6). Нам представляется, что асимметрия возникает из-за определенной разницы в свойствах барьеров в тесковых контактах к образцу, через которые в образец заводится возбуждение \bar{V} . Нелинейность и асимметрия ВАХ квантового диода обусловлены собственно детальным видом потенциального барьера и топологическим фактором вплавленных контактов в двумерный электронный канал R^{\square} . Детектирование \bar{V} (\bar{V}) обусловлено нелинейностью и асимметрией ВАХ и определяется величиной сопротивления образца. Заметим, что нелинейная связь $j(E)$ такова, что зависимость проводимости σ от E вполне тождественна $\sigma(T)$.

Находит объяснение геометрический эффект в зависимости \bar{V}_0 (\bar{V}). С увеличением межконтактного расстояния (рис. 4) увеличиваются сопротивление, а следовательно, и падение напряжения на нем. Точно так же объясняется и влияние магнитного поля. С увеличением магнитного поля растет сопротивление образца и детектируемый ток уменьшается, что вызывает снижение эффекта преобразования $\Delta\bar{V}_0/\Delta\bar{V}$ с возрастанием магнитного поля на образце.

В пользу изложенных соображений свидетельствуют температурные измерения зависимостей \bar{V}_0 (\bar{V}), которые представлены на рис. 7. Повышение температуры опыта до 30 К не изменило вида зависимости \bar{V}_0 (\bar{V}), но — характерная деталь: с увеличением температуры эффект преобразования $\Delta\bar{V}_0/\Delta\bar{V}$ уменьшается, что обусловлено уменьшением сопротивления из-за увеличения температуры.

Интересные результаты были получены при измерениях амплитудных характеристик \bar{V}_0 (\bar{V}) с постоянным смещением (рис. 7, кривые 1' и 1''), т. е. в точках 1' и 1'' кривой ВАХ рис. 6. Естественно было ожидать увеличения эффекта преобразования $\Delta\bar{V}_0/\Delta\bar{V}_0$ с возрастанием смещения из-за увеличения асимметрии ВАХ, что и имеет место в эксперименте. Наклон \bar{V}_0 (\bar{V}) у кривой 1'' становится меньше, чем для зависимости 1' при $\bar{V} \geq 20$ мВ. Это не связано с увеличением электронной температуры, так как разогрева электронов не наблюдается, о чем говорит отсутствие затухания осцилляций ШГ в таких

условиях. Уменьшение наклона $\Delta \bar{V}_0 / \bar{V}$, видимо, вызвано значительным уменьшением сопротивления, обусловленного нелинейностью ВАХ (рис. 6, кривая 1).

На основании выполненных исследований стационарной ЭДС V , инициированной внешним переменным электрическим полем, следует отметить наиболее общие свойства. ЭДС V имеет два компонента, первый из которых \bar{V}_0 уже имеется в отсутствие магнитного поля. Второй, осциллирующий компонент \bar{V}_B , стимулирован магнитным полем, и осцилляции \bar{V}_B имеют одинаковую природу с осцилляциями поперечного магнитосопротивления. Амплитудные характеристики ЭДС \bar{V} обнаруживают пороговый характер аппроксимации линейного участка зависимости $\bar{V}_{(0,B)}$ (\bar{V}) на $\bar{V} \rightarrow 0$. Существует напряжение отсечки $\bar{V}_0 = \bar{V}(\bar{V}_{(0,B)} = 0)$.

Вид зависимости $\bar{V}_{(0,B)}$ (\bar{V}) и ее особенности находят качественное объяснение в диодной теории контакта системы вырожденных $2D-3D$ -электронов, если учесть, что ВАХ структур имеет слабую нелинейную несимметрию.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А. Я. Шику и И. И. Сайдашеву за полезные дискуссии и обсуждение работы, С. В. Колосовой за помощь в работе над рукописью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sakaki H., Hirakawa H., Yoshino J., Sevansson S. P., Sekigushi Y., Hotta T., Nishi S., Minra N. // V Int. Conf. EP2DS. Oxford, 1983. P. 515.
- [2] Веселаго В. Г., Заварицкий В. Н., Нунупаров М. С., Беркут А. П. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44. В. 4. С. 382—384.
- [3] Сайдашев И. И., Савельев И. Г., Крещук А. М. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 45. В. 2. С. 95—98.
- [4] Grassie A. D. C., Lakrimi M., Hutchings K. M., Harris I. I., Foxon C. T. // Semicond. Sci. Technol. 1988. V. 3. P. 983—987.
- [5] Копьев П. С., Надточий М. Ю., Устинов В. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1110—1113.
- [6] Петросян С. Г., Шик А. Я. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1113—1116; ЖЭТФ. 1989. Т. 96. В. 6(12). С. 2229—2239.

Научно-исследовательский
технологический институт
Рязань

Получена 4.02.1991
Принята к печати 24.10.1991