

СВЕРХРЕШЕТКИ С НЕОРИЕНТИРОВАННЫМИ БАРЬЕРНЫМИ СЛОЯМИ

С. В. Гапонов, Б. М. Лускин, Н. Н. Салащенко

Обнаружен эффект стимуляции ориентированного роста на закрытых тонкими пленками поверхностях кристаллов. Исследованы многослойные структуры из сверхтонких монокристаллических пленок, разделенных неориентированными слоями. Показано, что структуры обладают свойствами квантовых сверхрешеток.

Принято считать, что квантовые сверхрешетки можно создавать на идеальных, т. е. предельно близкими кристаллографическими параметрами отдельных слоев, гетероэпитаксиальных структурах [1, 2]. В данной работе обсуждается возможный механизм обнаруженного авторами эффекта стимуляции ориентированного роста кристаллов на поверхностях, закрытых неориентированными пленками, и приведены исследования свойств полученных с использованием этого явления сверхструктур из чередующихся монокристаллических и неориентированных слоев.

Потенциальный рельеф поля поверхности слоя монокристалла существует на расстояниях, сравнимых с шагом решетки. Поэтому обычно эпитаксия наблюдается только на чистых поверхностях и даже монослой разориентированных атомов подавляет процесс [3]. На больших расстояниях $L \sim r_D$ (r_D – радиус Дебая) будут существовать поля только одиночных или достаточно разнесенных зарядов. Если их положение совпадает с узлами решетки, на таких же расстояниях будет сказываться ориентирующее действие кристаллической поверхности. Систему ори-

ентирирующих потенциалов можно создавать искусственно с помощью потока ионов. Когда энергия ионов такова, что они проникают через неориентированную прослойку и образуют дефекты типа вакансий в пограничном слое монокристалла, то некоторое время, определяемое временем жизни дефектов, поверхность структуры будет обладать ориентирующими свойствами.

Естественным образом, описанная ситуация возникает при распылении в вакууме мишени излучением лазера с интенсивностью $q > 2 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$. В этом случае прилету на подложку основной части испаренного вещества предшествует поток быстрых ионов с энергией $E_i \sim 10^2 \div 10^3 \text{ эВ}$ [4]. Положение максимума распределения внедренных ионов такой энергии для большинства материалов лежит в пределах $L \sim 10 \div 40 \text{ \AA}$ [5].

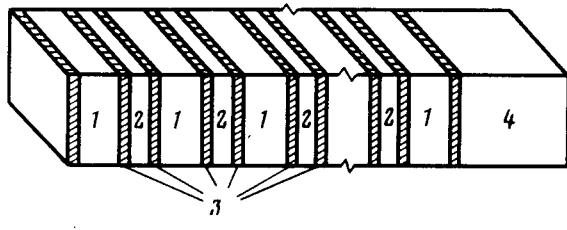


Рис. 1, а. Схематическая модель сверхрешетки со сложным периодом; 1 – монокристаллические пленки InSb, $L_1 = 100(50) \text{ \AA}$; 2 – монокристаллические пленки InSb, $L_2 = 20 \text{ \AA}$; 3 – неориентированные пленки GaAs, $L_3 = 10 \div 20 \text{ \AA}$

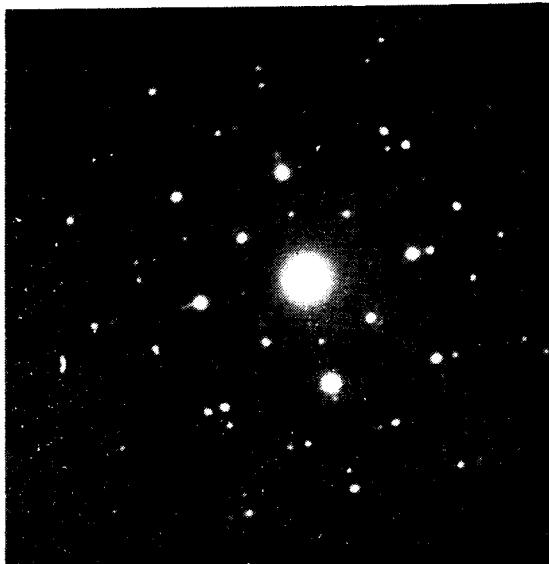


Рис. 1, б. Электронограмма периодической (10 периодов) гомоэпитаксиальной структуры InSb (50 \AA) – GaAs (10 \AA) – InSb (20 \AA) – GaAs (10 \AA)

В экспериментах использовался неодимовый лазер со следующими параметрами: длительность импульса $\tau_i \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$, энергия в импульсе до 3 Дж, интенсивность излучения на мишени $q \sim 10^8 \div 5 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$. Напыление проводилось как на неориентированные слои естественного происхождения, возникающие при промежуточных технологических операциях или в результате окисления, так и на специально нанесенные тем же лазером пленки известной толщины и состава, закрывающие

поверхность монокристаллической подложки. Пленки, образующиеся из лазерной плазмы вследствие больших скоростей поступления конденсата на подложку становятся сплошными при толщинах в несколько (3 ± 5) мономолекулярных слоев [6]. Ранее таким методом были получены как отдельные сверхтонкие сплошные пленки с различным структурным совершенством, от аморфных до монокристаллических [7, 8], так и многослойные периодические структуры на их основе [9, 10]. В данной работе в качестве материалов для неориентированных слоев использовались Te, Se, GaAs, Ti, Ta, C, As, Bi, т. е. материалы, отличающиеся как атомной массой, определяющей глубину проникновения быстрых ионов, так и проводимостью ответственной за экранировку электростатических полей. Материалами для ориентированных слоев служили полупроводники InSb, CdTe, PbTe. Структура и сплошность сверхтонких пленок исследовались на электронном микроскопе типа ЭМВ-100АК, разрешение микроскопа было не хуже 8\AA .

Материал монокристаллической пленки	Материал неориентированной прослойки			
	C	GaAs	Ge	Ta
InSb	25	15	12	10
PbTe	20	12	10	8
CdTe	20	12	10	10

Во всех случаях ориентированный рост пленок через неориентированные прослойки коррелировал с присутствием высокозэнергетичной компоненты в лазерной плазме. Максимальные толщины прослоек $L_{max}(\text{\AA})$, при которых наблюдалась эпитаксия приведены в таблице. Оценка толщин проведена по числу испаряющихся импульсов и средней толщине напыляемой за импульс пленки. Как показала проверка по размерному квантованию носителей тока в сверхрешетках и отражению рентгеновского излучения от многослойных структур точность такой оценки не хуже $10 + 15\%$ [9, 10].

Путем повторения циклов напыления были получены многослойные периодические структуры из сверхтонких ($L = 50 \pm 100\text{\AA}$) монокристаллических пленок InSb или PbTe, разделенных неориентированными слоями GaAs, C или Ge толщиной $10 + 20\text{\AA}$. Так как барьерные слои такой толщины обладают большой прозрачностью для уменьшения связи использовались структуры со сложным периодом (рис. 1, a). При такой геометрии дополнительными барьерами являются более тонкие монокристаллические пленки основного полупроводника. Это позволило уменьшить влияние рассеяния носителей тока в неориентированных слоях на свойства сверхрешеток.

Исследовались структурное совершенство и спектр оптического поглощения 10 и 20 периодных сверхрешеток. Измерялись вольт-амперные характеристики изготовленных на них диодов. Электронограмма структуры из 10 периодов приведена на рис. 1, б. Оптические измерения показали, что энергетический спектр носителей тока имеет минизонный

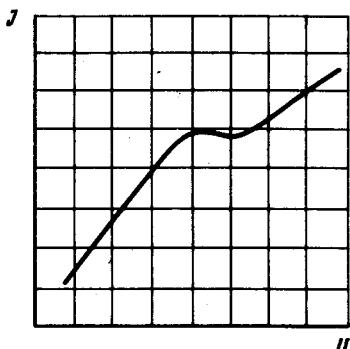
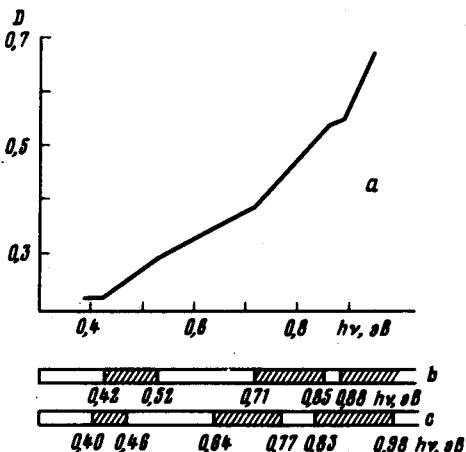


Рис. 2. Спектральная зависимость оптического поглощения (*a*), экспериментальное (*b*) и расчетное (*c*) положение минизон периодической (10 периодов) гомоэпитаксиальной структуры InSb (50 Å) – GaAs (10 Å) – InSb (20 Å) – GaAs (10 Å)

Рис. 3. Статическая вольт-амперная характеристика диода на сверхрешетке из 10 периодов вида InSb (50 Å) – GaAs (10 Å) – InSb (20 Å) – GaAs (10 Å), 0,5 мА и 0,05 В на деление

характер (рис. 2). Положение минизон находится в хорошем соответствии с данными расчета по дисперсионному уравнению вида

$$\cos kd = 2 \left(\frac{k_1^2 + k_2^2}{2k_1 k_2} \right) \sin(k_1 L_1) \sin(k_2 L_2) \operatorname{sh}^2(k_2 L_3) + \\ + \left(\frac{k_1^2 + k_2^2}{2k_1 k_2} \right) \sin[k_1(L_1 + L_2)] \operatorname{sh}(2k_2 L_3) + \cos[k_1(L_1 + L_2)] \operatorname{ch}(2k_2 L_3),$$

где L_1 и L_2 – толщины слоев образующих потенциальные ямы; L_3 – толщина барьера слоев; $d = L_1 + L_2 + 2L_3$ – период сверхрешетки,

$$k_1 = \left[\frac{2m_1^*}{\hbar^2} E \left(1 + \frac{E}{E_{g_1}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad k_2 = \left[\frac{2m_2^*}{\hbar^2} (V_o - E) \left(1 - \frac{V_o - E}{E_{g_2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

m_1^* и m_2^* , E_{g_1} и E_{g_2} – эффективные массы носителей тока и ширины запрещенных зон материалов проводящих (с индексом 1) и барьераных (с индексом 2) слоев, V_o – высота барьера. На статических вольт-ампер-

ных характеристиках, наблюдались участки с отрицательным сопротивлением (рис. 3).

Поступила в редакцию
19 июля 1980 г.

После переработки
14 апреля 1981г.

Литература

- [1] L.Esaki , L.L.Chang. Thin Solid Films , 36, 285, 1976.
- [2] А.Я.Шик. ФТП, 6, 268, 1974.
- [3] К.Л.Чопра. Электрические явления в тонких пленках. М., изд. Мир, 1972.
- [4] С.И.Анисимов, Я.А.Имас, Г.С.Романов, Ю.В.Ходыко. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы. М., изд. Наука, 1970.
- [5] Дж. Мейер, Л.Эриксон, Дж.Девис. Ионное легирование полупроводников. М., изд. Мир, 1973.
- [6] З.П.Бекетова, С.В.Гапонов, Б.С.Каверин, Б.А.Нестеров, Н.Н.Салащенко. Изв. высш. уч., зав., сер. Радиофизика, XVIII, 908, 1975.
- [7] С.В.Гапонов, Е.Б.Клюенков, Б.А.Нестеров, Н.Н.Салащенко, М.И.Хейфец. Письма в ЖТФ, 3, 632, 1977.
- [8] С.В.Гапонов, Б.М.Лускин, Б.А.Нестеров, Н.Н.Салащенко. Письма в ЖТФ, 3, 573, 1977.
- [9] С.В.Гапонов, Б.М.Лускин, Н.Н.Салащенко. ФТП, 14, 1468, 1980.
- [10] С.В.Гапонов; Е.С.Глускин, С.А.Гусев, Б.М.Лускин, Н.Н.Салащенко. Письма в ЖТФ, 6, 1411, 1980.