

О КАНАЛИРОВАНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ  
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

В. С. САРДАРЯН, Р. А. ГАСПАРЯН

Эффект каналирования в кристаллических твердых телах впервые теоретически был предсказан в работе [1]. В дальнейшем этот эффект и связанное с ним явление пространственного перераспределения потока заряженных ионов в кристаллических решетках были использованы в работе [2] для определения местоположения примесного атома в кристаллах. В [3] была отмечена возможность проявления нового эффекта — спонтанного излучения релятивистских каналированных заряженных частиц в рентгеновском и гамма-диапазонах. Экспериментальное наблюдение эффекта излучения каналированных частиц осуществлено в ряде работ (см., например, [4]), а в [5] теоретически проанализированы некоторые вопросы электродинамики спонтанного излучения.

В настоящей работе рассмотрен вопрос о каналировании релятивистских электронов в гетероструктурах и показано, что, регистрируя когерентное излучение каналированных электронов, можно определить порядковые числа  $Z$  атомов и межатомные расстояния в кристаллических атомных рядах и плоскостях гетероструктур. Обработка экспериментов по эффекту каналирования может дать информацию о структурном совершенстве и ширине границы перехода гетероструктур.

Кратко поясним суть дела. Когда электронный пучок попадает на определенную плоскость ориентированного кристалла и направление движения электронов составляет с данной атомной цепочкой кристалла угол, меньший угла Линдхарда [1], то несколько атомных рядов образуют канал, потенциал которого близок к гармоническому. Благодаря этому в канале формируется периодическое (поперек канала) движение электрона. Однократное и многократное рассеяния электронов на ядрах атомного ряда носят статистический характер, который приводит к деканалированию электронов, когда угол рассеяния становится больше критического угла Линдхарда.

Если составляющая скорости вдоль оси атомной цепочки достаточно большая, а электрон оказался довольно близко от ядра атома данного ряда и выполняется условие Линдхарда, то из-за скоррелированности актов рассеяния на отдельных ядрах цепочки электрон не может покинуть данный ряд атомов или атомную плоскость. В этих условиях канал формируется лишь одним атомным рядом или одной атомной плоскостью. Периодическое движение электронов в канале аналогично ондуляторному движению электрона, излучающего электромагнитные волны.

Как известно, когда лоренц-фактор  $\gamma \geq 30$ , потери энергии частиц на тормозное излучение при  $Z \geq 50$  преобладают над столкновительными потерями. При  $\gamma \geq 10^3$  основные потери движущегося в ориентированных кристаллах электрона обусловлены излучением из-за каналирования. Поэтому для определенности рассмотрим каналирование и связанное с ним когерентное излучение релятивистских электронов с  $\gamma \geq 10^3$ . Если достаточно коллимированными электронами сканировать гетероструктуру, то по излучению каналированных электронов можно получить информацию о порядковых числах атомов и межатомных расстояниях тех или иных атомных рядов.

Отметим, что при каналировании ионов или протонов канал формируется несколькими рядами атомов или атомных плоскостей. Следовательно, традиционная методика каналирования может дать информацию о совокупности всех атомных рядов и плоскостей, формирующих канал, а не об отдельном атомном ряде или отдельной плоскости. В этом смысле каналирование релятивистских электронов имеет существенное преимущество перед каналированием ионов.

Учет однократного резерфордовского рассеяния электронов, движущихся в канале, сформированном одним атомным рядом, приводит к тому, что средняя длина канала вдоль движения электронов оказывается порядка

$$l \simeq \frac{2ER_T^2}{Ze^2}, \quad (1)$$

где  $E$  — энергия электрона,  $R_T$  — средняя амплитуда теплового колебания атомов ряда,  $e$  — заряд электрона.

Средняя энергия когерентного излучения на длине канала равна

$$\Delta E = \frac{16Ze^4E^3}{3d^2(m_0c^2)^4}, \quad (2)$$

где  $d$  — межатомное расстояние рассматриваемого атомного ряда,  $m_0$  — масса покоя электрона,  $c$  — скорость света.

Частота излучения каналированного электрона есть

$$\omega_{из} = \gamma^2 \frac{ec}{R_T} \sqrt{\frac{2Z}{Ed}}. \quad (3)$$

Для иллюстрации оценим величины (1)–(3) на примере гетероструктуры  $GaAs - Al_xGa_{1-x}As$  [6] с ориентацией (100) с  $x = 0,5$  и постоянной решетки.  $GaAs$   $a = 565$  пм для случаев атомных рядов  $Ga_{z-31} [011]$ ,  $As_{z-33} [011]$ ,  $(Ga-Al)_{z_{cp}-22} [011]$ . В направлении [011] в  $GaAs$  межатомное расстояние равно  $a/\sqrt{2}$ . В этом случае оценка величин (1)–(3) дает следующие значения:

$$As \quad l = 23,6 \text{ мкм}, \quad \Delta E = 4,06 \text{ ГэВ}, \quad \omega_{из} = 6,1 \cdot 10^{23} \text{ Гц};$$

$$Ga \quad l = 25,1 \text{ мкм}, \quad \Delta E = 3,81 \text{ ГэВ}, \quad \omega_{из} = 5,9 \cdot 10^{23} \text{ Гц};$$

$$Ga - Al \quad l = 35,4 \text{ мкм}, \quad \Delta E = 27 \text{ ГэВ}, \quad \omega_{из} = 5 \cdot 10^{23} \text{ Гц}.$$

Как нетрудно видеть, интенсивности в разных атомных рядах сильно отличаются друг от друга, что легко детектировать экспериментально. Что же касается области перехода, то здесь преобладает тормозное излучение  $\sim \gamma$  [7], интенсивность которого при  $\gamma \geq 10^4$  будет приблизительно на порядок меньше вышеприведенных значений. Вследствие этого легко отличить границу перехода и определить среднюю плотность атомов в ней.

В заключение авторы выражают свою искреннюю благодарность Ж. И. Алферову и участникам руководимого им 8-го координационного совещания секции по полупроводниковым гетероструктурам за стимулирующее обсуждение работы.

Армянский педагогический институт  
имени Х. Абовяна  
Институт радиофизики и электроники  
АН АрмССР

Поступила 2. IX. 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Линдхард. УФН, 99, 249 (1969).
2. М. А. Кумахов. УФН, 115, 427 (1975).
3. М. А. Kumatov. Phys. Lett., 57A, 17 (1976).
4. А. О. Азянъянц и др. Препринт ЕФИ, 312 (37)—78, 1978.
5. М. А. Кумахов, Х. Г. Трикалинос. ЖЭТФ, 78, 1623 (1980).
6. В. Н. Андреев, Л. М. Долгинов, Д. Н. Третьяков. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов, Изд. Советское радио, М., 1975.
7. Дж. Джексон. Классическая электродинамика, Изд. Мир, 1965.

#### ՀԵՏԵՐՈՎԱՌՈՒՑՎԱԾ ՔՆՆԵՐՈՒՄ ՌԵԼՅԱՏԻՎԻՍՏԻԿ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ԿԱՆԱԼԱՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Վ. Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ռ. Հ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Հաշվված է ուղիարկված էլեկտրոնների կանալային միջին երկարությունը, նրանց կոհերենտ ճառագայթման միջին էներգիան և հաճախությունը հետերոկառուցվածքներում:

#### ON THE CHANNELING OF RELATIVISTIC ELECTRONS IN HETEROSTRUCTURES

V. S. SARDARIAN, R. A. GASPARIAN

The mean path of channeled relativistic electrons in heterostructures, the average energy and frequency of the emitted coherent radiation are calculated.