

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПЛОСКОСТНОМ КАНАЛИРОВАНИИ

Э.А.Бабаханян, С.А.Воробьев, Ю.В.Кононец, Д.Е.Попов

Экспериментально обнаружено чередование "двугорбой" и "трехгорбой" структур углового распределения релятивистских электронов при увеличении их энергии от 0,85 до 5,4 МэВ в условиях $\{110\}$ -плоскостного каналирования в кремнии. Проведен теоретический анализ явления и показано, что причинами его являются движение энергетических зон и специфическая сопутствующая перестройка волновых функций надбарьерных состояний.

1. Как показано в ¹, низколежащие надбарьерные состояния играют особую роль в явлении каналирования быстрых электронов, обеспечивая существование той фракции электронов, которая испытывает ослабленное неупругое взаимодействие с атомами кристалла. Релятивистская масса каналирующихся частиц при этом является параметром варьируя который, можно управлять положением надбарьерных энергетических зон и, тем самым, вносить существенные изменения в характер процесса каналирования.

В настоящей работе обнаружена ярко выраженная зависимость вида углового распределения электронов (УРЭ), прошедших через кристалл в условиях плоскостного каналирования, от энергии падающего пучка. Эта зависимость характеризуется сменой существенно различающихся "двугорбой" и "трехгорбой" структур и непосредственным образом связана с движением энергетических зон в эффективном потенциале кристаллографических плоскостей при увеличении релятивистской массы падающих частиц и с соответствующим весьма своеобразным изменением свойств волновых функций низколежащих надбарьерных состояний.

2. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне средних энергий на высоковольтном электронографе, созданном на базе ускорителя Ван — де Граафа, и на микротроне. Полная энергия электронов $E = mc^2\gamma$ имела значения, лежащие в интервале $0,85 \div 5,4$ МэВ. Угловые расходимости падающих пучков составляли $0,03 \div 0,1^\circ$ и были меньше соответствующих критических углов для $\{110\}$ -плоскостного каналирования в кремнии. УРЭ полученные путем фотометрирования некоторых электронограмм, снятых при параллельном расположении осей пучков и системы $\{110\}$ -плоскостей кристалла кремния толщиной $L \approx 5$ мкм, приведены на рис. 1.

При $E = 850$ кэВ электронограмма демонстрирует два пятна повышенной интенсивности, которым отвечают два максимума на кривой УРЭ, расположенные симметрично на углах $\phi = \pm 0,25^\circ$. При $E = 1,3$ МэВ боковые максимумы сближаются ($\phi = \pm 0,13^\circ$), а в направлении кристаллографической плоскости ($\phi = 0$) появляется третий. В случае $E = 2$ МэВ УРЭ вновь приобретает "двугорбый" вид с максимумами, лежащими при $\phi = \pm 0,1^\circ$. Увеличение энергии до 2,5 МэВ сохраняет два пика на кривой распределения, сдвигая их к значениям $\phi = \pm 0,07^\circ$. При $E = 5,4$ МэВ УРЭ, как и в случае $E = 1,3$ МэВ, имеет три максимума: центральный — в направлении плоскости и два боковых — при $\phi = \pm 0,1^\circ$.

3. Для качественного анализа явления существенно, что толщина используемого кристалла более чем на порядок превышает длину свободного пробега падающих электронов в аморфном веществе соответствующей плотности и состава. Поскольку в рассматриваемой области энергий эта длина является фактически длиной затухания недиагональных элементов матрицы плотности частиц в представлении блоховских функций ^{2,3}, то в УРЭ на выходе из кристалла должны отсутствовать когерентные эффекты, обусловленные интерференцией различных блоховских состояний. А тот факт, что электроны, находящиеся в подбарьерных состояниях, на такой толщине испытывают сильное рассеяние на атомах кристалла ¹, немедленно приводит к выводу, что "аномальная" часть УРЭ, обладающая тонкой структурой с двумя или тре-

ма максимумами, определяется теми электронами, которые находятся в низколежащей надбарьерной зоне и образуют фракцию, относительно слабо взаимодействующую с атомами кристалла.

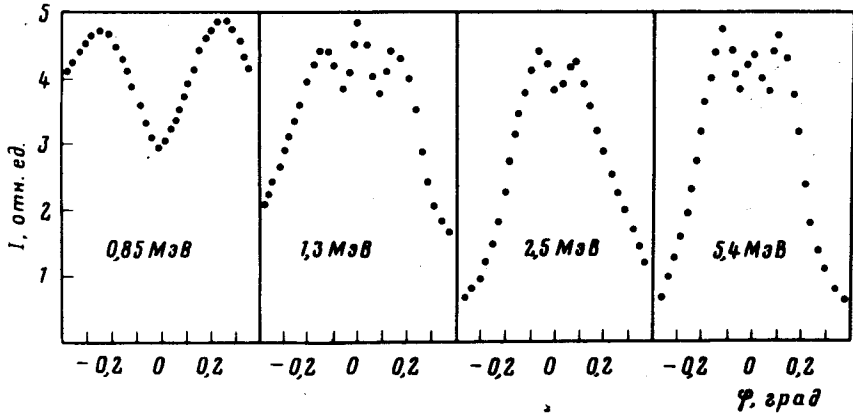


Рис. 1

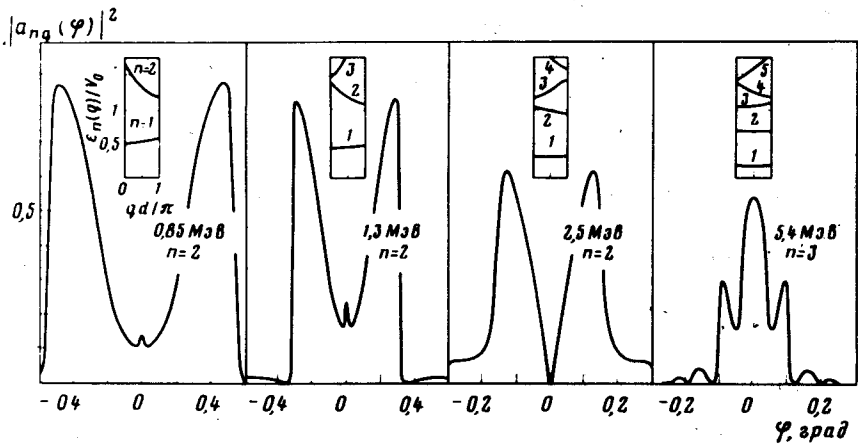


Рис. 2

Рис. 1. Экспериментальные угловые распределения электронов в плоскости, ортогональной системе $\{110\}$ -плоскостей кремния и проходящей через ось падающего пучка

Рис. 2. Зонная структура уровней энергии поперечного движения и угловые распределения для электронов в низколежащих надбарьерных зонах в модели Кронига – Пенни с указанными в тексте параметрами

Простые физические соображения позволяют считать при этом, что на выходе из кристалла все значения квазимпульса q ($|q| \leq \pi/d$, d – межплоскостное расстояние) в соответствующей зоне заселены почти однородно, и, следовательно, задача сводится к анализу свойств волновых функций a_{nq} низколежащих надбарьерных состояний в импульсном представлении, квадраты модулей которых и должны описывать наблюдаемые особенности УРЭ.

4. Для потенциалов с центром инверсии поведение $|a_{nq}|^2$ при малых q диктуется в первую очередь свойствами симметрии соответствующих блоховских функций $\Psi_{nq}(x)$ в координатном представлении. Так, если функция $\Psi_{nq}(x)$ в низколежащей надбарьерной зоне нечетна по x при $q=0$, то соответствующее $a_{nq}|_{q=0} = 0$ и УРЭ на выходе из кристалла имеет минимум в направлении $\{110\}$ -плоскости. При этом поскольку характерный импульс частицы в таком состоянии близок к $\sqrt{2EV_0}/c$, то максимумы $|a_{nq}|^2$ будут расположены вблизи углов

$$\phi \approx \pm \frac{1}{2} \left(\frac{2EV_0}{E^2 - E_0^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где V_0 – высота потенциального барьера, $E_0 = mc^2$ – энергия покоя электрона.

Четность же соответствующей блоховской функции при $q = 0$ незамедлительно влечет за собой $|a_{nq}|^2_{\phi=0} \neq 0$. Принимая во внимание эффект "зависания" частиц в областях над потенциальными барьерами, нетрудно видеть тогда, что, наряду с углами (1), в УРЭ оказывается выделенной также область углов вблизи $\phi = 0$. Однако ответ на вопрос о существовании и величине максимума углового распределения $|a_{nq}|^2$ при $\phi = 0$ в этом случае определяется расположением надбарьерной зоны относительно вершины потенциального барьера.

5. Наиболее нетривиальным во всей картине явления является тот факт, что при движении электронов с достаточно малой релятивистской массой в потенциале $\{110\}$ -плоскостей кремния вторая энергетическая зона при $q = 0$ обладает четной волновой функцией.

С ростом массы частицы эта зона постепенно "затягивается" в потенциальную яму, превращаясь в конце концов в зону подбарьерного типа. Но волновая функция блоховского состояния с $q = 0$ во второй подбарьерной зоне, очевидно, обладает отрицательной четностью. Следовательно, при некотором значении массы в рассматриваемой зоне должна происходить смена четности волновой функции с $q = 0$.

Детальный анализ показывает, что указанная смена четности происходит в надбарьерной области при таком значении релятивистской массы, для которого энергия верхнего края второй зоны зануляет коэффициент отражения от потенциальной ямы, образующей отдельное звено эффективного периодического потенциала. При этом ширина запрещенной полосы между второй и третьей зонами обращается в нуль и возникает вырождение данного значения поперечной энергии.

6. Суммируя вышеизложенное, приходим к следующей качественной картине энергетической зависимости вида УРЭ при $\{110\}$ -плоскостном каналировании в кремнии в рассматриваемом диапазоне энергий.

Для малых значений E , из-за достаточно высокого положения второй зоны над потенциальным барьером (первая зона целиком подбарьерная при любых E), УРЭ имеет "двугорбый" вид с минимумом при $\phi = 0$. При увеличении энергии этот минимум, за счет опускания второй зоны, превращается в максимум, относительная величина которого в "трехгорбой" картине растет до тех пор, пока не произойдет смена четности волновой функции с $q = 0$ во второй зоне.

С этого значения E и до момента полного "затягивания" второй зоны в подбарьерную область УРЭ вновь будет иметь симметричный двугорбый вид. Затем в игру вступает третья зона, обладающая четной волновой функцией при $q = 0$, и УРЭ приобретает симметричную "трехгорбую" структуру с хорошо выраженным центральным максимумом.

7. Соответствующие расчеты были проведены в модели плоскостного каналирования с потенциалом Кронига – Пенни⁴. Глубина потенциальной ямы имела обычное значение $V_0 = 24$ эВ, а ее ширина $a = 1/3 d = 0,64 \text{ \AA}$ была выбрана из условия соприкосновения "дна" второй энергетической зоны с вершиной барьера при энергии электронов, близкой к 2 МэВ, как это имеет место в реальной ситуации.

Движение низколежащих надбарьерных зон в рассмотренной модели характеризуется следующими энергетическими параметрами: смена четности блоховской функции с $q = 0$ во второй зоне происходит при $E = E_{\text{чет}}^{(2)} = 1,47$ МэВ, "дно" и "потолок" второй зоны касаются вершины барьера соответственно при $E_{\text{кас}}^{(2)} = 1,96$ МэВ и $E_{\text{ирова\ л}}^{(2)} = 2,68$ МэВ, для третьей зоны $E_{\text{кас}}^{(3)} = 7,84$ МэВ.

Рассчитанные кривые УРЭ представлены на рис. 2 и демонстрируют качественное согласие с результатами эксперимента.

Интересно отметить, что в модели Кронига – Пенни

$$E_{\text{чет}}^{(2)} = E_{\text{кас}}^{(2)} \left[1 - \left(\frac{a}{d-a} \right)^2 \right] \quad (2)$$

в то время, как, благодаря близости потенциала $\{110\}$ -плоскостей кремния к потенциалу типа Пешля – Теллера (см. ²), для которого коэффициент отражения от отдельной потенциаль-

ной ямы зануляется при $E \cong E_{\text{кас}}^{(2)}$, в реальной ситуации имеет место соотношение

$$E_{\text{чет}}^{(2)} \cong E_{\text{кас}}^{(2)} \quad (3)$$

и более низкое расположение надбарьерных зон приводит к тому, что центральный пик в "трехгорбом" УРЭ при $E < E_{\text{чет}}^{(2)}$ на эксперименте выделен сильнее, чем в проведенном модельном расчете.

Литература

1. Каган Ю., Бабаханян Э.А., Кононец Ю.В. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 776,
2. Kagan Yu., Kononets Yu.V., Mamontov A.A. Phys. Lett., 1979, 72A, 247.
3. Каган Ю., Кононец Ю.В. ЖЭТФ, 1973, 64, 1042.
4. Babakhanyan E.A., Kononets Yu.V. Phys. Stat. Sol. 1980, 98B, 59.

Ереванский физический институт
Научно-исследовательский институт
ядерной физики
Томского политехнического института
Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
19 декабря 1981 г.