

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭФФЕКТА АБСОЛЮТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВДОЛЬ ОСИ МОНОКРИСТАЛЛА

Б.Р.Мещеров, В.И.Туманов

Проведенные экспериментальные исследования перераспределения потока электронов при движении вдоль оси монокристалла указывают на интенсивное перемешивание подбарьерной и надбарьерной фракций на толщинах, сравнимых с периодом колебаний частиц в канале.

Движущиеся вблизи одного из главных направлений в кристалле электроны можно разделить на две фракции^{1, 2}: подбарьерные частицы, получившие меньшую "поперечную" энергию и совершающие финитное движение внутри потенциальной ямы, образуемой атомной цепочкой либо плоскостью и остальные частицы, перемещающиеся хаотически и образующие так называемую надбарьерную фракцию. При низких энергиях рассеяние электронов в силу квантовомеханических эффектов подавлено^{3, 4} и наблюдаются состояния устойчивого движения⁵. В пределе очень больших энергий движение частиц является классическим и также относительно устойчиво⁶ благодаря уменьшению отношения угла многократного рассеяния на периоде колебаний к углу Линдхарда. В промежуточной же области (для осевого потенциала это десятки МэВ) как показано в работе⁶, движение электронов является крайне неустойчивым из-за быстрого перемешивания подбарьерной и надбарьерной фракций.

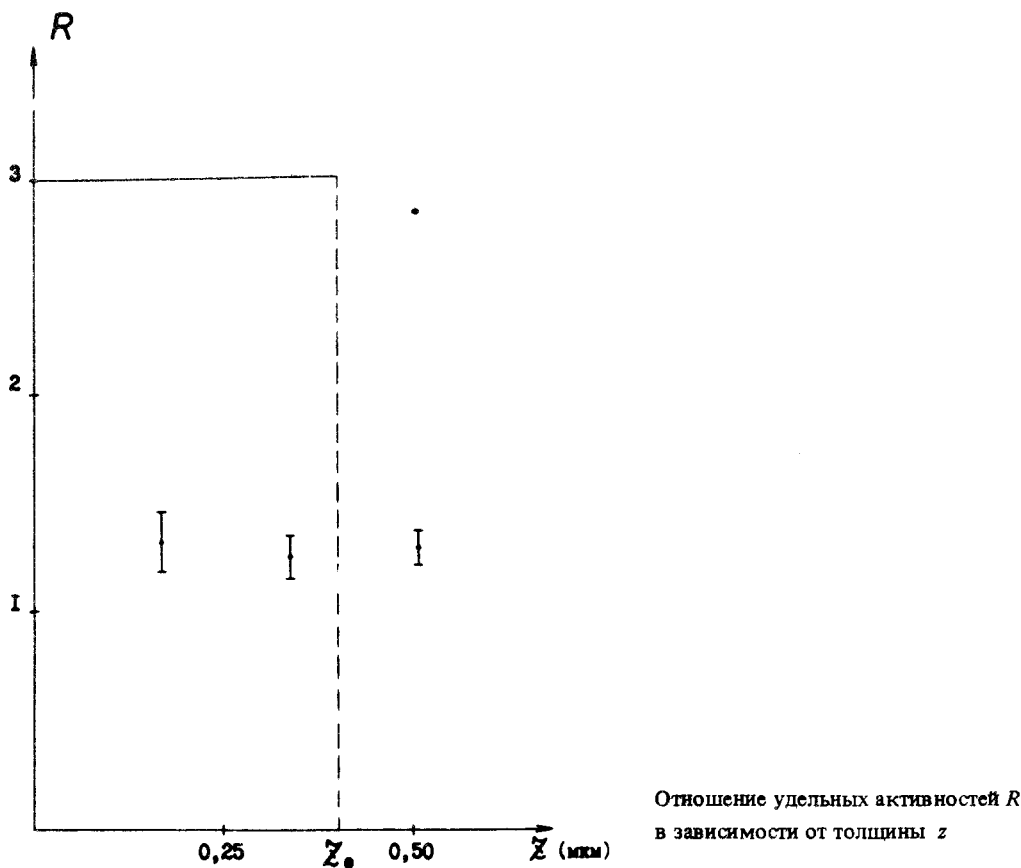
Чтобы обнаружить этот эффект, мы исследовали выход процесса с близкими соударениями¹⁾ (ядерной реакции) для ориентированной и разориентированной кремниевых мишеней на толщинах, соответствующих среднему времени перемещения в пределах потенциальной ямы. Поскольку этот масштаб длины невелик (около 0,4 мкм при энергии ~ 50 МэВ, см. ниже), была выбрана методика, основанная на анодном окислении кремния⁷⁻⁹ и позволяющая разбить образец на достаточно тонкие слои.

Облучение мишеней проводилось электронным пучком сильноточного импульсного линейного ускорителя "Факел" (ИАЭ им. И.В.Курчатова) со следующими параметрами: энергия частиц ~ 47 МэВ, расходимость пучка $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ и средний ток ~ 13 мкА. Мишени представляли собой совершенные монокристаллы толщиной ~ 50 мкм, изготовленные из кремния с небольшой добавкой бора (примесь замещения), необходимой для анодирования. Концентрация примесных атомов $\sim 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, т. е. практически не влияет на динамику прохождения электронов. Кристаллы вырезаны перпендикулярно оси $\langle 100 \rangle$ с точностью до 0,5°. Ошибка ориентирования не превышала $0,2\theta_L$, где θ_L - угол Линдхарда, который для перечисленных условий составляет $\sim 2 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, с учетом расходимости пучка, отклонение электронов от выбранного направления было не более $0,3\theta_L$.

Процедура разбиения облученного образца на слои состоит в многократном повторении двухстадийного процесса окисления поверхности мишени и растворения выращенной окисной пленки. Эллипсометрические измерения толщины слоя окисла, а также его воспроизводимости и однородности дают ~ 470 Å и $\pm 3\%$ соответственно. Для отношения Si/SiO₂ было получено значение $\sim 0,37$, т. е. в каждом цикле снимается ~ 170 Å кремния. По окончании процесса анодного окисления поверхность образца промывается и высушивается, после чего окисел стравливается каплей плавиковой кислоты, которая затем впитывается в полоску фильтровальной бумаги: кристалл вновь готов к окислению.

¹⁾ Как известно (см., например¹), выход процессов с близкими соударениями для подбарьерной и надбарьерной фракций различен.

При бомбардировке кремниевой мишени электронами из Si^{30} , содержащегося в естественной смеси в количестве $\sim 3\%$, по реакции $\text{Si}^{30}(e, 2pe')\text{Mg}^{28}$ с сечением $\sim 8 \cdot 10^{-31} \text{ см}^2$ получается β -активный изотоп Mg^{28} с периодом полураспада $\sim 21,2$ ч. Измерения активности проводились на низкофоновой ($150 \div 160$ отсчетов в час) установке УМФ-м (описание см. в ¹⁰). Для этого полоски фильтровальной бумаги, содержащие радиоактивные атомы, в специальной кассете по очереди помещались внутрь проточного пропорционального β -счетчика, входящего в состав установки. Эффективность регистрации по магнию составляет $\sim 0,5$. Чтобы получить достаточную статистическую обеспеченность по числу отсчетов были выбраны следующие параметры экспериментальной процедуры: время облучения мишени ~ 7 ч, толщина слоя кремния в каждом измерении активности $\sim 0,17$ мкм и время измерения — 3000 с.



В работах ^{11, 12} был развит квантовомеханический метод расчета, отличающийся полнотой и надежностью воспроизведения экспериментальных данных, связанных с каналированием электронов низких энергий. Используя совокупность получаемых этим методом величин, нетрудно рассчитать характерный масштаб длины и величину эффекта в нашем эксперименте²⁾. На рис. 1 горизонтальной линией нанесено ожидаемое значение в том случае, если перемешивание подбарьерной и надбарьерной фракций отсутствует. Точками нанесено отношение полученных в эксперименте удельных активностей ориентированной осью $\langle 100 \rangle$ вдоль пучка и разориентированной мишеней. Разительное, почти на порядок, несоответствие является, на наш взгляд, убедительным подтверждением абсолютной неустойчивости движения.

Авторы благодарны В.А.Базылеву и В.В.Головизнину за полезные обсуждения.

²⁾ Авторы благодарны С.А.Михееву за любезно предоставленные данные.

Литература

1. *Базылев В.А., Жеваго Н.К.* Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987.
2. *Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф.* УФН, 1982, **137**, 561.
3. *Базылев В.А., Головизнин В.В.* ЖЭТФ, 1982, **82**, 1204.
4. *Bazylev V.A., Goloviznin V.V.* Rad. Eff. 1982, **69**, 159.
5. *Andersen J.U. et al.* Nucl. Instr. Meth., 1982, **194**, 209.
6. *Базылев В.А. и др.* ДАН СССР 1986, **288**, 105.
7. *Manara A. et al.* Thin sol. films, 1971, **8**, 359.
8. *Barber H.D. et al.* J. Electrochem. Soc., 1976, **123**, 1404.
9. *Dearneley G. et al.* Can. J. Phys., 1968, **46**, 587.
10. *Симошенко Д.А. и др.* Практическое руководство по контролю искусственной радиоактивности в биосфере. М.: ИАЭ, 1964.
11. *Михеев С.А., Тулунов А.В.* ФТТ, 1985, **27**, 1307.
12. *Михеев С.А., Тулунов А.В.* ФТТ, 1986, 2447.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
5 февраля 1990г.