

О МЕХАНИЗМЕ АНОМАЛЬНОГО ПРОХОЖДЕНИЯ ПОЗИТРОНОВ ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛЫ

*И.Я.Дехтяр, В.Т.Адонкин, Э.Г.Мадатова,
В.И.Силантьев, Г.Длубек*

Изучались кривые угловой корреляции аннигиляционных фотонов в кристалле Si при 11, 80 и 300К. При низких температурах кроме узкой компоненты, соответствующей Ps, наблюдаются сателлиты, свидетельствующие о делокализации атомов Ps. Прохождение позитронов через кристалл связывается с реализацией квантового механизма диффузии Ps.

В работе [1] сообщалось о явлении наблюдаемом при взаимодействии позитронов с монокристаллом кремния¹⁾. Оказалось, что сравнительно толстые кристаллы Si (0,3 – 0,6 мм) являются в определенной степени прозрачными для позитронов ²²Na с максимальной энергией $\sim 0,54$ Мэв. В ряде случаев коэффициент пропускания позитронов от ²²Na достигал аномальной величины равной $\sim 0,5$, вместо допустимого, на основе закона поглощения, коэффициента равного $\sim 0,01 - 0,02$. Исследование взаимодействия частиц, прошедших через Si, с поверхностью других твердых тел свидетельствовало о том, что они представляют собой атомы Ps.

Большой интерес представляет, однако, выяснение состояния позитронов внутри кристалла Si, так как это может помочь, выяснению механизма конвертирования позитронов и их прохождения в кристалле.

Для этой цели изучались кристаллы Si(I), Si(II) и Si(III)²⁾.

1) Первое сообщение по данному вопросу было сделано 19 февраля 1976 г. на Ученом Совете ИМФ АН УССР.

2) Кристаллы отличались способом изготовления.

Спектры углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) для монокристаллов $n = \text{Si}(I)$ получали при различных температурах с помощью длиннощелевого спектрометра типа УА-64, снабженного гелиевым криостатом для низкотемпературных измерений.

На рис. 1 приведены УРАФ для трех температур: 300К (кр. 1), 80К (кр. 2) и 11К (кр. 3). Кристалл толщиной 0,3 мм гранью (111) помещался в спектрометре так, что измеряемая Z-компонента импульсного распределения соответствовала направлению $\langle 111 \rangle$. Угловое разрешение составляло 0,5 мрад, а кривые УРАФ получали с шагом 0,5 мрад. Статистическая погрешность составляла $\sim 1\%$. При низких температурах на кривых УРАФ четко видна узкая компонента и боковые периодически повторяющиеся сателлиты интенсивность которых убывает с увеличением угла θ . В то же время при 300 К на кривой УРАФ, указанных особенностей не видно. Указанные факты, до этого не наблюдались для кремния, и свидетельствуют о том, что позитроны в кремнии обладают состояниями, зависящими от температуры.

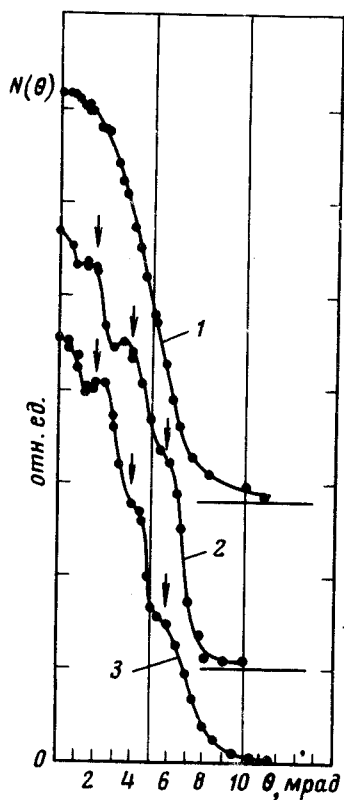


Рис. 1

Наблюдаемая при низких температурах узкая компонента свидетельствует об аннигиляции позитрона из пара-позитрониевого состояния. Сателлитные пики одинаковой полуширины занимают положения, соответствующие проекциям векторов обратной решетки на направление измеряемого момента системы. Интенсивность сателлитных пиков по отношению к центральной узкой компоненте в данном случае выражена сильнее, чем ранее наблюдаемые для кварца [2, 3] и льда [4].

На основе простой модели, развитой в [5], будем рассматривать электрон в атоме P_s и другие валентные электроны, с которыми позитрон взаимодействует в кристалле кремния, как неразличимые. Тогда совокупность указанных фактов позволяет считать, что в кристалле кремния при низких температурах p - P_s делокализован в движении его центра-массы, а его состояние может описываться блоховской функцией. В этом случае компоненты больших моментов в аннигиляционном спектре возникают как результат ортогонализации волновых функций P_s и валентных электронов кристалла. При чем амплитуда вероятности для аннигилирующей электронно-позитронной пары обладает трансляционной симметрией решетки. Это соответствует наблюдаемой картине.

Указанное состояние P_s в кристалле Si при низких температурах раскрывает определенные черты в характере его поведения. Во-первых, результаты свидетельствуют о том, что P_s образуется в совершенных областях решетки, а, во-вторых, поскольку вероятность делокализации P_s в кристалле существенно велика, то его движение в кристалле может рассматриваться как газ квазичастиц (примесонов) с постоянной скоростью. Это соответствует условиям необходимым для реализации квантовомеханического эффекта туннелирования примесонов [6]. Объективными факторами следует считать и то, что масса P_s очень мала, температура Дебая для Si $\Theta_D \sim 670\text{K}$ достаточно высока, а концентрация примесонов ничтожно мала.

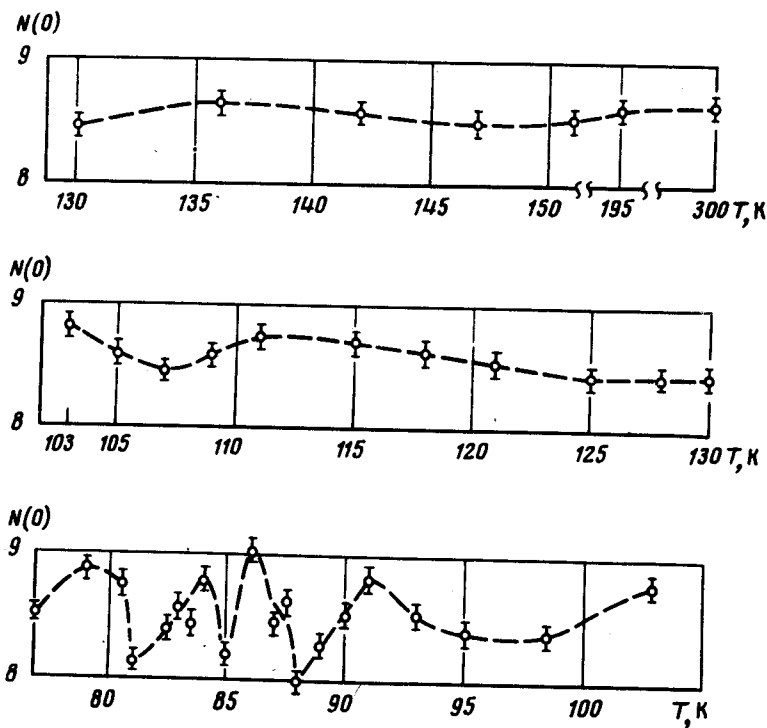


Рис. 2

Все вышесказанное позволяет предположить, что при 300K имеет место существенная локализация позитрониевых состояний, например, путем захвата P_s дефектами решетки, а также атомными колебания-

ми. Естественно, при этом прохождение P_s в решетке может осуществляться надбарьерным механизмом.

С этой точки зрения представляет интерес температурная зависимость $N(0)$, полученная для кристаллов n -Si (II) (рис. 2) и n -Si (III) (рис. 3).

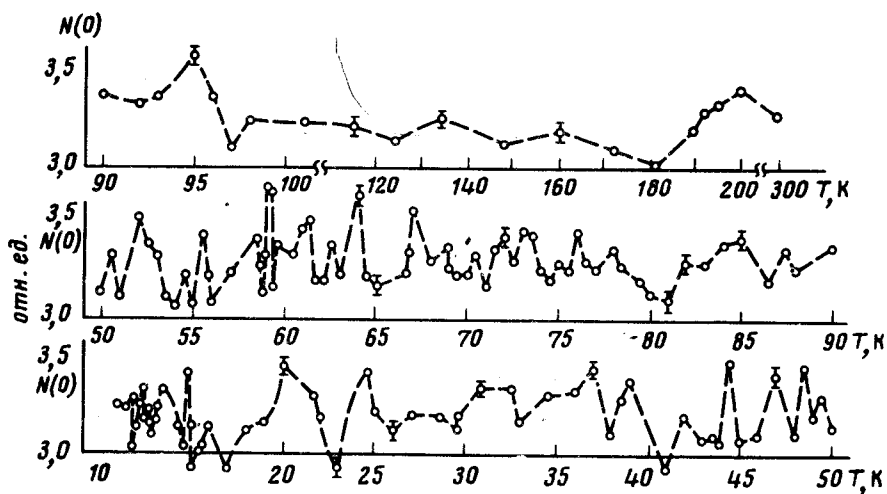


Рис. 3

В интервале температур 77 – 97К (для Si II) и 10 – 97К (для Si III) наблюдаются осцилляции, с максимальной амплитудой 12 и 18%, соответственно, которые с дальнейшим ростом температуры быстро затухают. Поскольку $N(0)$ включает пик для P_s на низкотемпературных кривых УРАФ (рис. 1), то наблюдаемые максимумы и минимумы на кривых $N(0) - T$ свидетельствуют о последовательном переходе P_s из делокализованного в локализованное состояние при взаимодействии с дефектами решетки. Сравнительно малый период наблюдаемых осцилляций свидетельствует о легкости с которой P_s переходит из локализованного состояния в делокализованное. Это, по-видимому, обеспечивает P_s возможность, даже при 300К, выхода из кристалла (подходящей толщины), что и наблюдалось в работе [1].

В заключение отметим, что по нашим данным эффективность конвертирования позитронов и выхода P_s из кристалла кремния зависит от степени их совершенства.

Для развития наших представлений о динамике P_s в кристаллах необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

Институт металлофизики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
17 июня 1977 г.

Литература

- [1] И.Я.Дехтяр, Э.Г.Мадатова, В.И.Силантьев, В.Т.Адонкин. Письма в ЖЭТФ, 23, 691, 1976.

- [2] W.Brandt, G.Coussot, R.Paulin, Phys.Rev.Lett., 23, 522, 1969.
- [3] A.Greenberger, A.P.MillsThompson., S.Berko. Phys. Lett. 32A, 72, 1970.
- [4] O.Mogensen, G.Kvajič, M.Eldrup, M.Milošević - Kvajič.Phys.Rev., 134, 71, 1971.
- [5] C.H.Hodges, B.T.A.McKee, W.Triftshäuser, A.T.Stewart.Canad. J.Phys., 50, 103, 1972.
- [6] А.Ф. Андреев.УФН, 118, 251, 1976.
-