

Методика измерения температуры кристалла кремния в циркулирующем протонном пучке У-70

В.Т. Баранов, А.А. Логинов, В.И. Терехов, В.Н. Чепегин, Ю.А. Чесноков
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Изогнутые монокристаллы кремния широко применяются для вывода протонного пучка [1, 2], а также в системе локализации потерь [3]. При работе с достаточно большой интенсивностью пучка в кремнии возникают значительные тепловые и радиационные нагрузки, которые могут привести к дислокациям в кристаллической решетке и уменьшению эффективности захвата. Если воздействие радиационных нагрузок изучено [1] и они слабо влияют на процесс каналирования, то воздействие тепловых процессов при высокой интенсивности в кремнии пока изучено недостаточно. В данной работе описана техника измерения температуры кристалла кремния при взаимодействии его с циркулирующим пучком протонов с энергией 70 ГэВ.

Наиболее прямым методом измерения температуры кристалла могла бы быть регистрация теплового излучения его поверхности в области попадания пучка. Однако потоки вторичных частиц, образующихся в кристалле при взаимодействии с протонами, создают при этом значительные трудности.

В данном случае наиболее простым способом является измерение с помощью микро-термопары, расположенной на кристалле вблизи области взаимодействия с пучком.

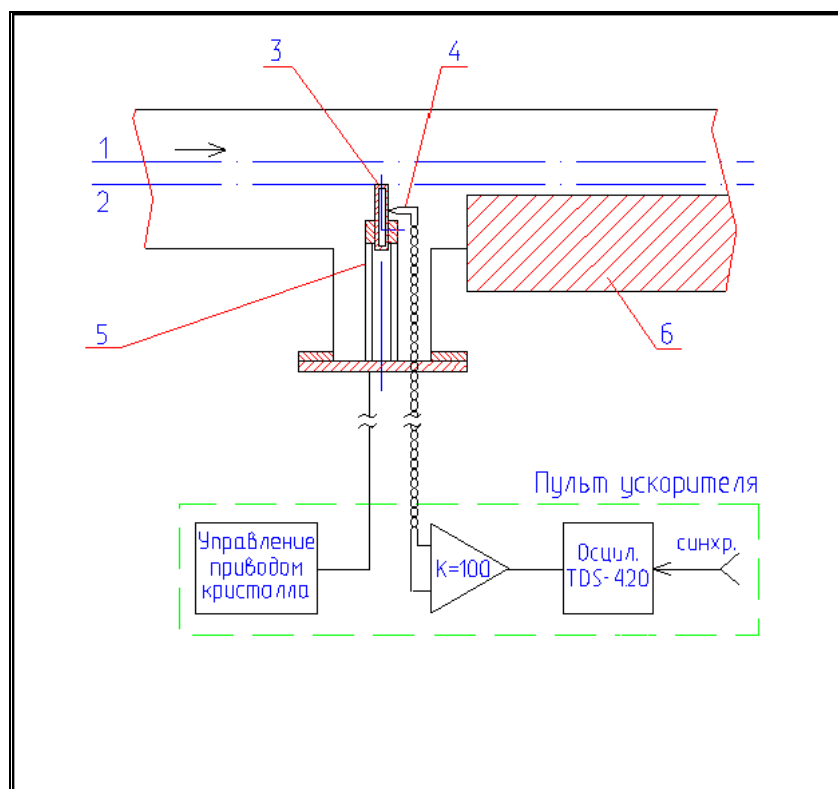


Рис. 1. Схема установки и измерения нагрева кристалла: 1 – ускоренный пучок; 2 – отклоненный пучок; 3 – рабочая область кристалла; 4 – термопара; 5 – держатель; 6 – поглотитель пучка.

Схема взаимного расположения кристалла, пучка и термопары в данном эксперименте показана на рис.1. Кристалл размещался перед стальным поглотителем длиной ~2,5 м [4], который ограничивал возможность попадания протонов на термопару. Кристалл использовался для отклонения протонов на угол ~1 мрад и обеспечивал заброс пучка в режиме каналирования [3]. Кремниевая пластина 0-образного вида имела размеры длиной по пучку 5 мм, высоту 5 мм и толщину 0,7 мм. Общая длина кристалла составляла 50 мм и предназначена для изгиба на нужный угол с помощью элементов крепления. Кристалл выдвигался с помощью механизма привода мишенной станции за границу поглотителя до 10 мм, что обеспечивало возможность многократного прохождения протонного пучка.

Термопара располагалась на расстоянии 15 мм от края кристалла. При таком ее расположении не происходил нагрев термопары пучком, а также в измерительной аппаратуре отсутствовал сигнал от δ -электронов, которые обычно возникают при взаимодействии протонов с мишенью. В качестве термопары использовались сваренные концы хромель-алюмелевых проводников толщиной 0,2 мм и длиной около 300 мм. Такие проводники практически не вносили вклад в процесс теплопередачи от кристалла к его держателю и механизму перемещения.

Основными трудностями при такой методике измерения температуры является малая величина термо-э.д.с. и большие уровни электрических помех, создаваемых различными технологическими системами ускорителя, такими, как вакуумные насосы, ускоряющие станции и др. Для регистрации полезного сигнала в данной работе использовался измерительный усилитель типа AD620 с высоким значением подавления синфазных наводок. Коэффициент усиления данной схемы составлял $K = 100$. Сигнал с термопары поступал на усилитель по витой паре длиной около 600 м. Регистрация сигнала осуществлялась с помощью цифрового осциллографа TDS-420. На рис.1 показана упрощенная схема измерения температуры кристалла.

При подготовке к эксперименту проводилась калибровка термопары и аппаратуры непосредственно в кольцевом зале ускорителя при нагревании в термостате расплава свинца. Термопара к кристаллу крепилась с помощью специального прижима. Надежность такого контакта проверялась путем сравнения подпаянной и прижатой термопары на поверхности термостата.

В течение одного цикла разогрев и остывание носит импульсный характер. Разогрев осуществлялся в течение десятков циклов, затем кристалл выводился из пучка. Измерение температуры проводилось при нагревании и остывании кристалла. Проведенные измерения показали, что тепловое равновесие между кристаллом и его держателем устанавливается примерно через 10 минут при разогреве в течение каждого цикла длительностью 9,8 с. При этом кристалл находился в разориентированном состоянии. Результаты измерений представлены на рис.2. Естественно, что в области взаимодействия пучка с веществом кремния температура существенно выше, чем в точке установке термопары.

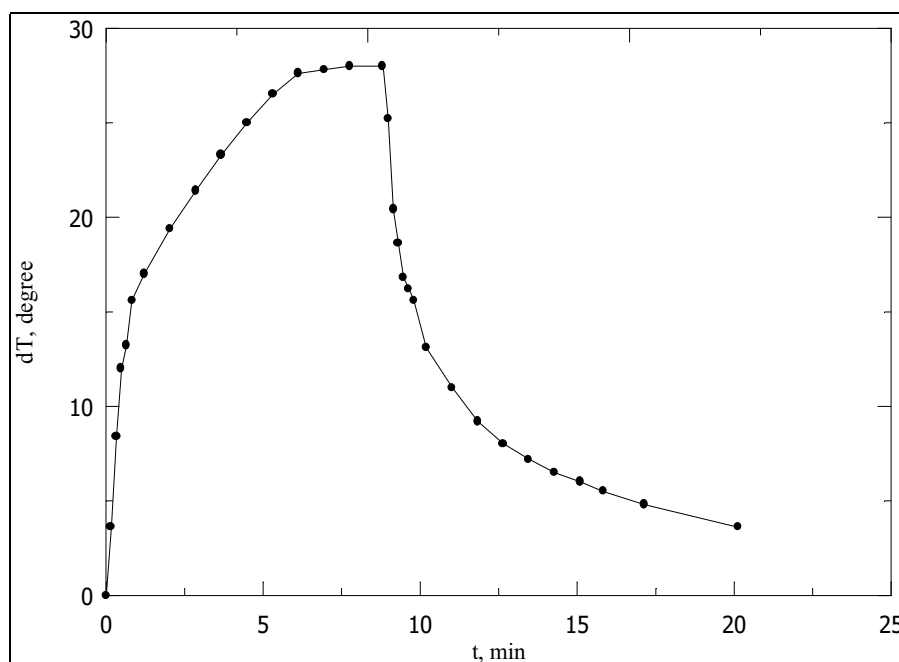


Рис. 2. Зависимость изменения температуры при нагревании и остывании кристалла. (Интенсивность $I=10^{12}$ р, интервал между циклами 9,8 с).

При наведении пучка на кристалл в нем возникает температурное поле, связанное с интенсивностью и временем взаимодействия пучка с веществом кристалла. В данной геометрии установки кристалла соотношение числа протонов, заброшенных на поглотитель, и числа протонов, испытавших ядерные взаимодействия в кремнии, примерно одинаково. Разогрев кристалла в основном обусловлен ионизационными потерями протонов в кремнии. При интенсивности $I=10^{12}$ протонов в цикле выделяемая в кристалле мощность, отнесенная к длительности цикла, составляет ориентировочно 3 Вт. Как видно из рис.2, через 10 мин. после начала облучения устанавливается тепловой баланс между выделяемой пучком мощностью и мощностью отво-

димой от кристалла вследствие теплопроводности. В установившемся режиме изменение температуры вдоль кристалла определяется выражением

$$\Delta T = P \cdot L / \lambda \cdot S ,$$

где P – выделяемая мощность в кристалле; L, S – длина и поперечная площадь кристалла; λ – коэффициент теплопроводности.

Как отмечалось, измерение температуры производилось в одной точке вне области взаимодействия с пучком на расстоянии 15 мм. При этом разница в температурах, от точки измерения до торца кристалла при интенсивности $I = 10^{12}$ протонов не будет превышать 70°C .

Очевидно, что при одной и той же интенсивности сброса пучка максимальная величина нагрева за много циклов определяется теплоотводом от кристалла. Из рис.2 видно, что после прекращения сброса пучка за время 1,5 мин температура кристалла уменьшается в два раза. Эта величина характеризует возможность механизма перемещения охлаждать кристалл без принятия каких-либо специальных мер. При широком использовании кристаллов на ускорителях они могут иметь различную форму и способы крепления. Соответственно и нагрев кристаллов может меняться в большем диапазоне, что требует контроля их температуры.

Проведенные исследования показали надежность рассмотренного способа измерения температуры кристалла, находящегося в циркулирующем пучке ускорителя.

Литература

- [1] Бирюков В.М., Котов В.И., Чесноков Ю.А. УФН. 1994.т.164, N10, с. 1017.
- [2] Афонин А.Г., Бирюков В.М. и др. Письма в ЖЭТФ, т. 68, с. 544, 1998.
- [3] Chesnokov Yu. et al. Using bent crystals for loss localisation in IHEP accelerator. – Proceed. of the EPAC'2000.
- [4] Асеев А.А., Кучинин С.Л. и др. Препринт ИФВЭ 80-104. – Протвино, 1980.