

РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА
В РЕЗУЛЬТАТЕ СВЕРХПЛОТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ
ЕГО ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ

Д. И. Вайсбурд, И. Н. Балычев

1. Процессы, происходящие в треке тяжелой ионизирующей частицы, моделировались в макроскопических объемах твердых тел. Образцы облучались кратковременно ($\sim 10^{-8}$ сек) мощным потоком электронов так, чтобы средняя плотность энергии возбуждений достигала, как в сердцевине трека, $W \sim 10^{20} - 10^{22}$ эв/см³ [1]. Для этого нами изготовлен и приспособлен ускоритель со следующими параметрами импульса электронов: верхняя энергия частиц 0,3 Мэв; длительность регулируется в интервале $(7 - 30) \cdot 10^{-9}$ сек; а плотность тока – в пределах $(0,01 - 1) \cdot 10^3$ а/см². Ускоритель разработали Месяц и Ковальчук; в нем используется явление взрывной автоэмиссии с острейшего катода в сильных электрических полях [2]. Мы обнаружили, что облучение одиночным импульсом вызывает разрушение твердого тела, если средняя плотность энергии, поглощенной за время импульса, превосходит

характерный для этого вещества порог $W_{\text{разр}}$. Эффект проявляется следующим образом: 1) тонкие пластинки 0,01 – 0,5 мм ионных (LiF, NaF, NaCl, KCl, KBr, CaF₂) и ковалентных (Ge, Si) кристаллов испытывают хрупкое разрушение, раскалываясь на части. Число осколков бывает велико и зависит от плотности пучка Φ . Величина $\Phi_{\text{разр}}$ и $W_{\text{разр}}$ определялись из условия разрушения образца на два осколка.

	Ge	LiF	NaF	NaCl	KCl
$\Phi_{\text{разр}} \cdot 10^{13}$ электронов/см ²	3,0	1,7	1,3	1,1	0,7
$W_{\text{разр}} \cdot 10^{20}$ эв/см ³	15,0	3,0	2,3	2,0	1,1

2) В толстых образцах возникают фигуры Лихтенберга, состоящие из трещин толщиной 0,1 – 1 мкм. 3) В пластичных телах наблюдаются следы взрывного радиоллиза: пузырьки газа, вспучивание и эрозия поверхности. Используемые для облучения электроны практически всю энергию, теряемую в веществе, передают прямо его электронной подсистеме (ЭП) и только незначительную часть, $\sim 10^{-4}$ – непосредственно ядерной (ЯП). Таким образом, в наших экспериментах показано, что непосредственное возбуждение только ЭП твердого тела может привести к его хрупкому разрушению, и установлен необходимый для этого порог, $W_{\text{разр}}$.

2. Самые низкие $W_{\text{разр}}$ наблюдаются у щелочногалоидных кристаллов (ШГК). При таких уровнях возбуждения не разрушаются ни металлы, ни полупроводники, ни стекла, ни органические диэлектрики. Разрушение твердых тел под действием мощных излучений обычно связывают с электрическим пробоем или нагреванием [3]. Эксперименты показывают, что ни первое, ни второе не являются в данном случае причиной разрушения ШГК. 1) В образец, толщина которого больше пробега электронов (0,45 мм в NaCl), вносится заряд $\sigma = e\Phi_{\text{разр}} = 10^{-6} - 10^{-5}$ к/см² за импульс. По уравнению Пуассона поле при этом достигает $2\pi\sigma/\kappa \approx 10^6 - 10^7$ в/см и может вызвать пробой (κ – диэлектрическая проницаемость). Действительно, в толстых пластинках оргстекла и других диэлектриков возникало большое число каналов незавершенного пробоя. Следы пробоя отсутствуют в тонких пластинках тех же веществ, так как в них поглощается меньше электронов. Но эффект разрушения сохраняется. Прямыми измерениями заряда пучка электронов до и после образца NaCl показано, что при уменьшении его толщины от 0,45 до 0,01 мм поглощенный заряд уменьшается более, чем в 10 раз, а $W_{\text{разр}}$ и $\Phi_{\text{разр}}$ изменяются менее, чем на 20%. Не устраняет разрушения нанесение на поверхность платиновых электродов и завертывание в заземленную алюминиевую фольгу. Тонкие пластинки ШГК получены методом растворения и химического полирования. 2) Даже полное превращение $W_{\text{разр}}$ в тепло нагревало бы NaCl всего на 20°. Прямым экспериментом мы показали, что при таком нагреве механические напряжения, возникающие за счет градиентов температуры, не могут привести к разрушению. Использовался пучок диаметром 5 мм. Интенсивности в центре и на краях отличались не

более, чем на 25%. Размер образцов $4 \times 4 \times 0,1$ мм гарантировал отсутствие существенных градиентов температуры как по поверхности, так и по толщине образца. Измерения показывают, что в пластинках NaCl, толщиной 0,1 мм, поглощается не более 30% пучка электронов. Затем часть образца закрывалась пластинкой кристалла. Чистота поверхностей скола последнего обеспечивала резкую в пределах 1 мкм границу между облученной и необлученной частями. Здесь создавался максимально возможный при $W_{\text{разр}}$ градиент температур. Однако разрушающие трещины возникали в центре образца, где плотность пучка была выше. 3) Известно, что взаимодействие возбужденной ЭП с ЯП приводит не только к нагреванию, но и образованию радиационных дефектов. За $10^{-15} - 10^{-11}$ сек все высокоэнергетические возбуждения ЭП превращаются в низкоэнергетические: электроны и дырки, которые при безызлучательной рекомбинации в ШГК эффективно создают F-центры и междоузельные атомы. На пару таких дефектов затрачивается 40 – 100 эв [4]. Таким образом, за счет $W_{\text{разр}}$ в NaCl может образоваться не более $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ пар дефектов. Облучая NaCl протонами, мы довели концентрации этих дефектов до $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³, но при этом кристаллы не разрушались [5]. Складывается впечатление, что при равномерном распределении поглощенной энергии, равной $W_{\text{разр}}$, разрушение кристаллов маловероятно. Учет случайных (пуассоновских) флуктуаций числа падающих электронов, вторичных возбуждений и радиационных дефектов показывает, что они не существенны. Действительно, в треках высокоэнергетических ионов плотность электронных возбуждений может намного превосходить $W_{\text{разр}}$ [1]. Но это не приводит к хрупкому разрушению образца, а только к сильным локальным изменениям. Для разрушения необходимо, чтобы наименьший линейный размер возбужденной области $l_{\text{разр}}$ был намного больше диаметра трека, равного 0,001 – 0,01 мкм [1]. Мы приняли $l_{\text{разр}} \sim 0,1 - 1$ мкм; это порядка толщины трещин. Случайные флуктуации в таких областях ничтожны.

При $W_{\text{разр}}$ в ШГК образуется плотная сетка взаимодействующих электронов и дырок с интервалом 30 – 50 Å. Мы предполагаем, что их конденсация приводит к образованию в ШГК макрообластей с плотностью энергии возбуждений, намного превышающей среднюю. Впервые Келдыш [6] рассмотрел возникновение "электронно-дырочных капель" в полупроводниках. Там экситон имеет большой радиус $a \sim 100$ Å и малую энергию связи $\epsilon \sim 0,02$ эв. Поэтому электроны и дырки объединяются в конденсоны Ванье – Мотта – Келдыша с равновесной плотностью частиц $10^{17} - 10^{18}$ см⁻³, стабильные при низкой температуре. В ШГК a порядка межатомного расстояния, а $\epsilon \sim 1$ эв. Поэтому, мы полагаем, система электронов и дырок при комнатной температуре способна сжиматься в конденсоны Френкеля с равновесной плотностью $10^{21} - 10^{22}$ см⁻³. При этом W может достигать плотности энергии связи, что заведомо достаточно для разрушения.

Томский
политехнический институт
им. С.М.Кирова

Поступила в редакцию
2 марта 1972 г.
После переработки
4 апреля 1972 г.

Литература

- [1] Д.И.Вайсбурд, Н.С.Кравченко, Л.А.Меликян, П.Д.Алексеев. Изв. АН СССР, Сер. физ., 35, 1364, 1971; Д.И. Вайсбурд, А.А.Воробьев, Л.А.Меликян. АЭ, 30, 538, 1971.
 - [2] Г.А.Месяц и др. Известия высш. уч. зав., Физика, №5, 153, 1969.
 - [3] С.И.Анисимов и др. Действие излучения большой мощности на металлы. Москва, 1970.
 - [4] М.Hirai, Y.Kondo, T.Yoshinari, M. Ueta. J. Phys. Soc. Japan, 30, 1071, 1971.
 - [5] Д.И.Вайсбурд, С.М.Минаев, Н.Л.Терентьев. Изв. АН СССР, сер. физ., 33, 870, 1969.
 - [6] Л.В.Келдыш. Труды IX Международн. конф. по физике полупроводников, Москва, 1969.
-