

торый в ряде халькогенидных стекол является обратным.

В некоторых стеклообразных полупроводниках переход в высокопроводящее состояние может быть осуществлен под действием света. Это открывает большие возможности для использования их в области печати. Из аморфного полупроводника с таким запоминаемым переключением можно изготовить постоянную матрицу и сделать с нее неограниченное число электрографических отпечатков без необходимости добавочного экспонирования. Вообще одной из наиболее перспективных областей использования некристаллических полупроводников является область получения изображения.

11.5. АМОРФНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Аморфные диэлектрики в виде тонких пленок находят широкое применение в микроэлектронике. Во многих таких диэлектриках, так же как и в аморфных полупроводниках, проводимость (весьма незначительная!) осуществляется путем перескоков из одного локализованного состояния в другое. Энергия активации этого процесса значительно ниже, чем энергия активации примесной проводимости в кристаллических диэлектриках.

Поскольку аморфные диэлектрики имеют более низкую плотность, чем соответствующие кристаллы, их диэлектрическая проницаемость несколько понижена по сравнению с кристаллическими аналогами.

Диэлектрические потери аморфных диэлектриков существенно зависят от ширины щели подвижности. Если ширина щели подвижности невелика, то потери обусловлены, в основном, прыжковой проводимостью.

11.6. АМОРФНЫЕ МЕТАЛЛЫ

В последние годы проявляется исключительно большой интерес к новому классу материалов — аморфным металлам, называемым также металлическими стеклами. Аморфное состояние металлов наблюдалось уже давно при осаждении слоев металла из электролита и при термическом напылении на холодную подложку. В настоящее время создана весьма экономичная и высокопроизводительная технология получения аморфных металлов, в основе которой лежит быстрое (со скоростью больше 10^6 K/c) охлаждение тонкой струи расплавленного металла. По-видимому, любой расплав можно привести к твердому аморфному состоянию. Установлено, однако, что формирование аморфных слоев облегчается, если к металлу добавить некоторое количество примесей. Еще более благоприятные

условия для получения металлического стекла создаются при осаждении сплавов «металл—металл» и «металл—металлоид». Полученные таким образом металлические стекла обладают весьма интересными свойствами, обусловленными особенностями атомной структуры.

Атомная структура металлических стекол. Как и в любом другом некристаллическом веществе, в аморфном металле отсутствует дальний порядок в расположении атомов. Данные по рассеянию рентгеновских лучей аморфными телами можно пытаться объяснить как в рамках «микрорекристаллитной» структуры, так и в рамках модели непрерывной сетки. Исследования последних лет, в частности, опыты по электрон-позитронной аннигиляции, дают веские основания считать, что в аморфном металле существует распределение атомов без каких-либо разрывов типа границ зерен и точечных дефектов, характерных для кристаллов. Предполагается, что в металлическом стекле существует хаотическое непрерывное распределение сферических частиц, характеризующееся плотной упаковкой. Координационные числа, определенные по площади под первым пиком функции радиального распределения, в большинстве случаев оказываются равными 12, т. е. они больше, чем для жидких металлов.

При нагревании в аморфных металлах происходят структурные изменения. В отличие от обычных стекол (оксидных), которые при нагреве размягчаются и переходят в расплав, а при охлаждении расплава снова образуется стекло, металлические стекла при повышении температуры кристаллизуются. Эта особенность обусловлена металлическим типом связи. Температуры кристаллизации (T_k) аморфных металлических сплавов в твердом состоянии достаточно велики. Например, для сплавов переходных металлов с металлоидами T_k превышает $(0,4 \div \div 0,6) T_{пл}$.

Механические и коррозионные свойства. Особенности атомной структуры металлических стекол, приводящие к отсутствию в них таких дефектов, как дислокации, границы зерен и т. д., обуславливают очень высокую прочность и износостойкость. Так, например, предел прочности аморфных сплавов на основе железа существенно больше, чем у наиболее прочных сталей. При испытании аморфных металлических сплавов на растяжение обнаруживается их удлинение, т. е. эти сплавы в отличие от оксидных стекол, являются пластичными.

Наиболее характерными чертами структуры изломов разрушения аморфных сплавов являются: 1) разрушение (при растяжении) идет по поверхности, составляющей угол 45° с осью нагружения, т. е. в плоскости действия максимальных сдвиговых напряжений; 2) излом всегда включает одну или две переходящих одна в другую плоскости максимальных сдвиговых

напряжений; 3) в структуре излома присутствуют две различные зоны: почти гладкие участки и области с характерной «венной» структурой. Все это вместе с образованием разрывов на краях излома, выступов и шеек, образующихся в отдельных местах, свидетельствует о протекании при разрушении аморфных металлов процессов вязкого течения.

Высокие прочностные свойства и свойства износостойкости уже дали ряд важных применений аморфных металлов (например, в головках для магнитной записи).

Металлические аморфные сплавы обладают очень высокой коррозионной стойкостью. Особенно большую стойкость проявляют сплавы железа и никеля, содержащие хром. Высокая устойчивость металлических стекол к коррозии связана прежде всего с отсутствием границ зерен, включений и т. п.

Электрические свойства. По электропроводности аморфные металлы ближе к жидким металлам, чем к кристаллическим. Удельное сопротивление ρ аморфных металлических сплавов при комнатной температуре составляет $(1-2) \cdot 10^{-4}$ Ом·см, что в 2—3 раза превышает ρ соответствующих кристаллических сплавов. Это связано с особенностями зонной структуры аморфных металлов. В кристаллических металлах длина свободного пробега электрона составляет примерно 50 периодов решетки даже при T , близкой к температуре плавления. Отсутствие дальнего порядка в металлических стеклах обуславливает малую длину свободного пробега, соизмеримую с межатомным расстоянием. Следствием этого является повышенное удельное сопротивление и слабая зависимость его от температуры.

Многие аморфные металлические сплавы при низких температурах переходят в сверхпроводящее состояние. Исследование их сверхпроводящих свойств представляет большой интерес как с точки зрения развития теории сверхпроводимости, так и с точки зрения технических применений. Температура сверхпроводящего перехода (T_c) для аморфных металлов обычно ниже, чем для соответствующих кристаллов. Значения T_c для различных сплавов заключены в интервале 2,4—9,0 К.

Преимуществом аморфных сверхпроводников по сравнению с кристаллическими является высокая стабильность их сверхпроводящих и механических характеристик по отношению к радиационным воздействиям. Это имеет практическое значение, например, при использовании сверхпроводящих магнитов в ядерных реакторах.

Магнитные свойства. Наибольший интерес представляют магнитные свойства аморфных сплавов переходных (Mn, Fe, Co, Ni, ...) и редкоземельных (Eu, Gd и т. д.) металлов с другими металлами и металлоидами. При достаточно высоких температурах эти сплавы находятся в парамагнитном состоянии. Температурные зависимости магнитной восприимчивости хо-

Таблица 13.2. Магнитные свойства аморфных и кристаллических сплавов редкоземельных металлов с непереходными металлами

Аморфный сплав	θ , К	$\mu^*_{эф}$ (μ_B /атом R)	Кристаллический сплав	θ , К	$\mu^*_{эф}$ (μ_B /атом R)
Gd ₅₀ Ag ₅₀	130	8,36	CdAg	-84	8,24
Tb ₅₀ Ag ₅₀	76	9,8	TbAg	-36	10,15
Dy ₅₀ Ag ₅₀	20	10,08	DyAg	-23	10,45
Nd ₅₀ Ag ₅₀	-37,5	4,11	NdAg	-3	3,53
Tb ₅₂ Au ₄₆	38	9,83	TbAu	-23	9,54
Gd ₆₂ Cu ₃₈	150	—	GdCu	-70	8,6

* Эффективный магнитный момент, приходящийся на атом редкоземельного элемента R.

рошо описываются законом Кюри—Вейсса. При понижении температуры ниже θ в них возникает магнитное упорядочение. Магнитное упорядочение аморфных сплавов может быть ферромагнитным, антиферромагнитным, а также ферримагнитным. В ряде случаев наблюдается состояние спинового стекла. Спиновое стекло характеризуется замораживанием спиновых магнитных моментов в случайных направлениях при температуре ниже некоторой характеристической. Заметим, что состояние спинового стекла обнаружено также и в некоторых кристаллах.

Во многих случаях аморфные металлические сплавы упорядочиваются ферромагнитно, несмотря на то, что их кристаллические аналоги являются антиферромагнитными. Это свидетельствует о том, что при аморфизации структуры может измениться характер обменного взаимодействия. Выше отмечалось, что разупорядочивание атомной структуры приводит к уменьшению длины свободного пробега электронов проводимости, которая в аморфных металлах и сплавах может иметь порядок межатомного расстояния. Это означает, что значительно понижается вклад обменного взаимодействия через электроны проводимости.

В табл. 13.2 сравниваются некоторые магнитные свойства аморфных и кристаллических сплавов редкоземельных металлов с непереходными металлами. Изменение знака θ свидетельствует об изменении характера обменного взаимодействия.

Наибольший практический интерес вызывают в настоящее время аморфные сплавы на основе переходных материалов группы железа. Они относятся к классу магнитомягких материалов и отличаются высокой магнитной проницаемостью и низкой коэрцитивной силой. Значения коэрцитивной силы этих сплавов зависят от химического состава сплавов. По сравнению с поликристаллическими магнитомягкими материалами аморфные сплавы обладают рядом преимуществ: более низкими по-

терями по сравнению с трансформаторной сталью, повышенной прочностью, более низкой чувствительностью магнитных свойств к деформации. Важным преимуществом является более низкая стоимость производства. Все это открывает широкие перспективы использования аморфных магнитных сплавов.

Первая попытка создать теорию аморфных ферромагнетиков была сделана в 1960 г. А. И. Губановым. В настоящее время в этом направлении ведется большая работа и различные теоретические модели являются предметом широкой научной дискуссии. Тех, кто интересуется указанной проблемой, отсылаем к специальной литературе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физика твердого тела, как наука, сравнительно молодая и бурно развивающаяся область физики. То, что изложено в настоящем учебнике, уже более или менее устоялось и во многих случаях не требует существенного пересмотра. В то же время новые открытия в области физики твердого тела часто приводят к необходимости изменения ряда существовавших ранее представлений. Так, например, экспериментальные исследования в области некристаллических твердых тел и сделанные здесь открытия привели к переоценке роли дальнего и ближнего порядка, открытие высокотемпературных сверхпроводников требует несколько по-иному взглянуть на механизм образования куперовских пар и т. п. В связи с этим мы старались написать все главы учебника таким образом, чтобы прочитанный материал оставлял место для размышлений.

Авторы надеются, что настоящая книга будет полезна не только физикам, непосредственно занимающимся физикой твердого тела, но и инженерам, работающим в области электронной техники и микроэлектроники.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М., 1979.
2. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. М.: Мир, 1988.
3. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М., 1974.
4. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. М., 1977.
5. Жданов Г. С. Физика твердого тела. М., 1961.
6. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., 1978.
7. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание с помощью тензоров и матриц. М., 1974.
8. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела. М.: ВШ, 1985.
9. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М., 1966.
10. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. М.-Л., 1950.