

ОБРАЗОВАНИЕ ШНУРА ПРОВОДИМОСТИ И ПРОБОЯ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОКСИДЕ ИНДИЯ

Соловьева А. Е.

При наложении электрического поля до $10 \cdot 10^2$ В/м к образцам оксида индия в них возникает шнур проводимости, который горит в течение 2 с. Температура поверхности образца достигает 1600°C . В таких условиях материал не разрушается. Разрушение и пробой происходят при $12 \cdot 10^2$ В/м.

Исследованы условия возникновения шнура и пробоя в оксиде индия. Показано, что разогрев образца до 1600°C не приводит к изменению физико-химических свойств.

Проведен энергетический анализ возникновения шнура проводимости. Показано, что при наличии электрического поля энергия активации проводимости составляет 0.28 ± 0.01 эВ, что в 2.4 раза меньше, чем при термическом действии на оксид индия.

Металлографически, электронно-микроскопически определены величины отверстий канала проводимости пораженной части образца, размер включений-кластеров, которые образуются в процессе разрушительного горения шнура. Показано, что при разрушении происходят изменение химического состава оксида вокруг канала шнура и массоперенос восстановленной структуры как по направлению поля, так и перпендикулярно ему. Проведена оценка разрушающих напряжений, возникающих вокруг включений-кластеров.

Оксид индия — полупроводник n -типа. По структурным свойствам он аналог оксидам скандия, иттрия, редкоземельным оксидам типа R_2O_3 . В кубической стехиометрической структуре типа C содержится 25% закономерно упорядоченных анионных вакансий, которые являются элементами структуры $[1-4]$.

При пропускании тока через полупроводниковый образец происходит лавинообразное нарастание температуры и проводимости. Это явление возникает, когда равновесная проводимость образца является резко растущей функцией температуры. Тепловой пробой сопровождается оптической и электрической нестабильностью $[5-8]$.

Настоящая работа посвящена исследованию образования шнура проводимости и пробоя в поликристаллическом оксиде индия.

Поликристаллические стехиометрические образцы оксида индия получали из порошка In_2O_3 марки ОСЧ методом горячего прессования. Оптимальные режимы прессования выбирали по данным $[9]$. Физические и структурные свойства таких образцов приведены в работах $[1, 2]$.

Электрическое поле $2-12 \cdot 10^2$ В/м подавали через контакты из сплава ЭИ-625 на образцы массой 18–20 г и размером $5 \times 5 \times 20$ мм.

Измерение проходящего тока через образец проводили с помощью амперметра типа М110.

Температуру поверхности образца до 1000°C измеряли термопарой, а выше — стационарно закрепленным пирометром с точностью до $\pm 30^\circ\text{C}$.

Время горения шнура в образцах в критических режимах измеряли секундомером. Время и температуру усредняли по 10 испытываемым образцам.

После пробоя и разрушения образцов проводили исследование в отраженных лучах на микроскопе МИМ-8 и электронном микроскопе «Тесла».

Зависимость плотности тока от электрического поля приведена на рис. 1.

Температура, выделяемая при прохождении через образец электрического тока, сравнима с рассчитанной по следующей зависимости:

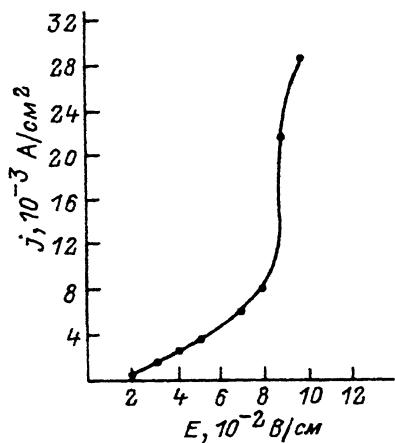


Рис. 1. Зависимость плотности тока от величины приложенного поля.

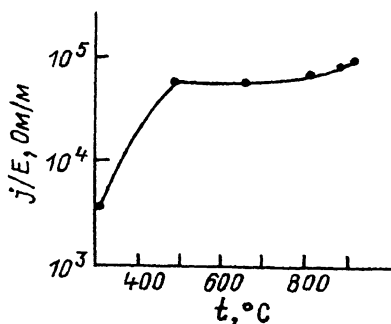


Рис. 2. Зависимость j/E от температуры поверхности образца оксида индия при наложении электрического поля.

$$cdvt \sim jE, \quad (1)$$

где c — теплоемкость оксида индия [10], d — плотность образца [2], v — объем, j — плотность тока, E — величина приложенного поля, t — температура.

При сравнении термического воздействия на оксид индия (см. [2], рис. 2) и влияния электрического поля на проводимость в настоящей работе обнаруживается следующая зависимость: при нагреве образцов до 500°C проводимость осуществляется с энергией активации 0.14 ± 0.01 эВ, от 500°C и выше в образцах проводимость имеет энергию активации 0.68 ± 0.01 эВ. Такое существенное различие в энергии активации проводимости в оксиде индия при нагреве можно объяснить наличием при 500 — 650°C фазового превращения упорядоченной фазы в неупорядоченную типа C .

При действии электрического поля до $4 \cdot 10^2$ В/м на образец температура его достигает 500°C (рис. 2), проводимость носителей осуществляется с энергией 0.12 ± 0.01 эВ. Энергия активации проводимости в оксиде индия при нагреве до 500°C и подаче электрического поля до $4 \cdot 10^2$ В/м одинакова. Подача электрического поля приводит к упорядоченному перемещению свободных носителей заряда по направлению электрического поля.

Дрейфовая скорость носителей должна оставаться постоянной, если свободные носители теряют в процессе движения кинетическую энергию, при этом выделяется джоулево тепло. Кинетическая скорость носителей соизмерима с дрейфовой скоростью при отсутствии захвата носителей заряда [5].

На зависимости рис. 2 излом наблюдается при 500°C , и выше этой температуры проводимость практически не меняется. В этой температурной области изменяется интенсивность рассеяния электронов, связанная с фазовым переходом в оксиде индия.

Увеличение электрического поля до $8 \cdot 10^2$ В/м приводит к повышению температуры до 900°C и росту проводимости с энергией активации 0.28 ± 0.01 эВ.

При сравнении с термическим нагревом образцов [2] действие электрического поля уменьшает энергию активации проводимости в 2.4 раза.

В результате действия электрического поля $10 \cdot 10^2$ В/м появляется шнур. Он горит в течение 2 с. Если электрическое поле уменьшить до



Рис. 3. Микроструктура образца в поперечном сечении, полученная в электронном микроскопе, $\times 70$.



Рис. 4. Микроструктура включений, полученная в электронном микроскопе, $\times 2600$.

$2 \cdot 10^2$ В/м, шнур гаснет и снова загорается при повышении поля. За время горения шнура температура образца достигает 1600°C . Электрические свойства образцов после охлаждения не изменяются. Обратимость свойств связана с тем, что нарушения в структуре, по-видимому, находятся на микроуровнях и интегрально измерением электрофизических свойств нарушения не обнаруживаются.

Свечение шнура вызвано неупругими процессами возбуждения атомов свободными носителями до фотонного излучения.

Рост электрического поля до $12 \cdot 10^2$ В/м приводит к пробое и разрушению образца. Причем образец разрывается строго по поперечному сечению.

Микроструктура пробоя, полученная в электронных лучах, приведена на рис. 3.

Пораженный участок составляет в диаметре $1.7 \cdot 10^{-4}$ м, сквозное отверстие в диаметре $0.55 \cdot 10^{-4}$ м. Вокруг отверстия наблюдаются продукты перекристаллизации после расплава. Материал вспучен в виде воронок. Можно предположить, что в канале образца температура превышала 2000°C .

Отверстия канала и пораженного участка окружены фазами серо-черного цвета, что указывает, на необратимое восстановление материала и изменение химического состава оксида индия по содержанию кислорода.

Кристаллы расплава имеют вытянутую шестиугольную форму с яркими включениями. Эти включения-кластеры с яркой отражательной способностью в косых лучах окрашены в серый цвет. Такое изменение окраски оксида наблюдали после отжига в вакууме при 900°C , когда происходит изменение в анионной и катионной подрешетках и появляются фазы моноклинной, гексагональной модификаций иного химического состава [1, 2].

Серая фаза с яркой отражательной способностью в оксиде индия подобна фазе Al_2O_3 , которая появляется в оксиде алюминия при высоких температурах в процессе восстановления и под действием облучения ионами ксенона [11]. Можно предположить, что в данном случае серая фаза и яркие включения соответствуют гексагональной модификации с химическим составом In_2O_3 .

Черная фаза представляет собой столбчатую структуру и состоит, по-видимому, из кубической и моноклинной фаз.

В процессе разрушительного горения, свечения шнура происходит массоперенос по направлению поля и перпендикулярно ему. При торможении частиц происходят локальные изменения структуры в виде образования

дефектов — анионных вакансий, которые возникают при изменении химического состава оксида глубоко от канала шнура. Такие включения-кластеры имеют размер $1-1.5 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4). Яркие включения окружены черными окантовками, которые еще раз подтверждают, что материал восстанавливается при торможении таких включений в более холодной части материала.

В зонах сильных возбуждений, распространяющихся по образцу путем маспереноса, возникают локальные структурные превращения, которые движутся как элементы другой структуры.

Проведенный анализ показывает, что в деформированном материале возникают механические поля вихревой природы, порождающие вихревые пластические течения кристаллов. В таких условиях материал испытывает направленные фазовые переходы. При этом выделяется энергия по направлению и перпендикулярно электрическому полю.

Величину напряжений, возникающих при образовании включений, можно оценить как

$$\sum \varepsilon \frac{\Delta v}{v} \sim \sum \sigma (v - v_{\text{вк}}), \quad (2)$$

где σ — напряжения, v — объем включения с учетом пораженной зоны вокруг включений, $v_{\text{вк}}$ — объем включения, ε — энергия образования анионной вакансии [1, 2].

Число включений-кластеров в поперечном плоском сечении образца определяли на микроскопе МИМ-8. Число таких кластеров составляло $\sim 500 \text{ см}^{-2}$. Напряжения, возникающие от одного кластера, составляют 0.14 ГПа, $\Sigma \sigma \sim \sim 7$ ГПа, что в 11 раз больше предельного напряжения на сжатие исходных образцов оксида индия, равного 0.61 ГПа.

Естественно, в таком напряженном состоянии материал не может существовать, он разрывается.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Обнаружено образование шнура проводимости и пробоя в поликристаллическом оксиде индия при наложении электрического поля до $12 \cdot 10^2$ В/м.

Исследованы причины возникновения шнура и пробоя. Определено, что шнур горит в течение 2 с. При этом температура образца достигает 1600°C .

Проведен энергетический анализ возникновения шнура и определены величины отверстий канала шнура, пораженной зоны, размер включений и зоны вокруг включений. Проведена оценка напряжений, возникающих в материале при образовании включений иного химического состава.

Автор благодарит Э. М. Диасамидзе, Э. В. Щетинину, Ю. И. Лукианчикова за помощь и консультации в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Соловьева А. Е., Жданов В. А., Марков В. Л., Швангирадзе Р. Р. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1982. Т. 18. В. 5. С. 825—828.
- [2] Соловьева А. Е. // О фазовых превращениях в поликристаллическом оксиде индия. М., 1987. № 7. С. 22—27.
- [3] Самсонов Г. В. // Физико-химические свойства окислов. М., 1978. 680 с.
- [4] Соловьева А. Е. // О фазовом превращении в поликристаллическом оксиде скандия. М., 1989. № 6. С. 29—32.
- [5] Постников В. С. Физика и химия твердого состояния. М., 1978. 543 с.
- [6] Райс Т., Хенсель Дж., Филипс Т., Томас Г. Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках. М., 1980. 350 с.
- [7] Даргис А. Ю., Жураускас С. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 3. С. 455—459.
- [8] Ашкинадзе В. М., Бельков В. В., Субашиев А. В. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 4. С. 1193—1198.

- [9] Соловьева А. А., Швангирадзе Р. Р., Жданов В. А. //А. с. № 1058942 СССР. 1983. БИ. № 45.
- [10] Угай Я. А. Введение в химию полупроводников. М., 1975. 246 с.
- [11] Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Романова Г. Я., Соловьева А. Е. // ФХОМ. 1989. № 6. С. 25—30

Физико-технический институт
им. И. Н. Векуа
Сухуми

Получена 10.04.1991
Принята к печати 21.08.1991
