

СТРИМЕРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ПРИМЕР
САМООРГАНИЗАЦИИ В ОТКРЫТЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ

Проф. В.П.Грибковский, А.Л.Гурский
(Институт физики АН РБ, г.Минск)

Монокристаллические образцы полупроводников, в которых распространяются стримерные разряды [1], являются открытыми термодинамическими системами, обменивающимися с окружающей средой веществом (носители заряда) и энергией (электрическое поле). В таких системах возможно возникновение самоорганизованных структур. Не исключено, что стримерные разряды являются именно такими структурами.

Для возникновения самоорганизованных структур необходимо, помимо открытости системы, выполнение следующих условий: состояние системы должно быть далеко от термодинамического равновесия; поведение подсистем, образующих систему, должно быть согласованным; должен выполняться универсальный критерий эволюции Пригожина-Глендсдорфа о минимальном производстве энтропии [2-4].

Установлено, что самоорганизация структур носит пороговый характер, они возникают из хаоса, определяются объемными свойствами системы, а не граничными условиями, могут разрушать друг друга при взаимодействии.

Стримерные разряды в полупроводниках отвечают всем вышеперечисленным требованиям.

1) Они возникают при большом отклонении системы от термодинамического равновесия. Напряженность внешнего электрического поля может достигать 10^6 В/см и более, а концентрация неравновесных носителей заряда - до 10^{20} см⁻³. Интенсивность возбуждения среды в большинстве случаев достаточна для получения ичверсной населенности и генерации света.

2) В образовании и эволюции стримеров принимают участие электронная, решеточная и фотонная подсистемы. Их поведение взаимно согласуется вследствие электрон-фононного, электрон-фотонного и фотон-фононного взаимодействия, так что все системы испытывают взаимное влияние. Это является предпосылкой согласованного поведения всех этих подсистем.

3) Линейный кристаллографически ориентированный стример является более организованным процессом, чем диффузия зарядов

или коронный разряд, поэтому критерий Пригожина-Гленсдорфа о минимальном значении производной энтропии в этом случае может выполняться.

4) Возникновение стримерных разрядов имеет пороговый характер по скорости нарастания электрического поля. Для кристаллов CaS $(dE/dt)_{\text{min}} \approx 10^{-5}$ в/см.с [1]. При меньших dE/dt стримеры не возникают при амплитудах электрических импульсов до сотен киловольт.

5) Стримерные разряды возникают из хаоса, так как при любом способе возбуждения объемный заряд, инжектированный в кристалл, не имеет какой-либо структуры, а затем возникают кристаллографически ориентированные разряды. Иногда ориентированные разряды могут возникать из коронного объемного разряда, когда он достигает поверхности кристалла.

6) Звезда стримеров в кристалле отражает его объемные свойства, обусловленные дальними, а не ближайшим порядком в решетке, поскольку стримеры нечувствительны к наличию точечных дефектов. Звезда стримеров практически не зависит от амплитуды возбуждающих импульсов, формы и размеров образца. Характеристики каждого отдельного стримера (поперечное сечение, скорость распространения, спектр излучения и т.д.) также не определяются местом их образования.

7) С целью выяснения характера взаимодействия стримеров между собой были поставлены специальные опыты, при которых использовалось свойство стримеров "отражаться" от поверхности кристалла в эквивалентных кристаллографических направлениях (рис.1), благодаря чему они могут быть направлены навстречу друг другу. Для возможно большего совмещения треков в пространстве использовались пластинки естественного роста толщиной порядка видимых размеров трека (несколько микрон), ориентированные в плоскостях распространения стримеров, т.е. $\{10\bar{1}0\}$. Для учета стохастичности процесса набиралась статистика поведения разрядов в геометрии рис.1. Всего было получено и проанализировано более 100 фотографий. Установлено, что, как правило, более интенсивный стример гасит второй, пересекающийся с ним. В трех случаях наступило обоюдное гашение, а в одном погасивший стример вновь возобновился, хотя нельзя исключать его зарождение и с какого-либо дефекта.

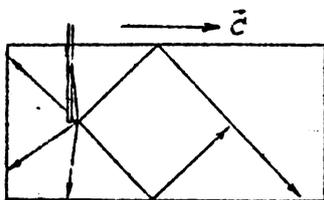


Рис.1. Схема распространения стримеров в пластинке (1010) GaS.

Таким образом, стримеры в полупроводниках обладают всеми свойствами, характерными для кооперативных самоорганизованных структур, поэтому их теоретическое описание должно базироваться на решении соответствующих нелинейных уравнений.

1. Грибковский В.П. Стримерное свечение в полупроводниках //ЖПС, 1984.-Т.40, № 5.-С.709-718.
2. Эбелин В. Образование структур при необратимых процессах.-М.: Мир, 1979.-280 с.
3. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах.-М.: Мир, 1979.-517 с.
4. Хакен Г. Синергетика.-М.: Мир, 1980.-404 с.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Hypothese formuliert, dass die kristallographisch orientierten Streamer-Entladungen in Halbleitern zur Klasse selbstgeordneter Vorgänge gehören. Folgende Eigenschaften hinweisen darauf: die Entladungen entstehen in einem veröfneten, stark vom Gleichgewichtszustand entfernten thermodynamischen System; es gibt Voraussetzungen zum übereinstimmten Verhalten der Phononen-, Photonen- und Elektronensystem bei Entladungsentwicklung und zur Befriedigung des Kriteriums über minimalen Entropieproduktion. Die Entladungserscheinung einem Schwellencharakter besitzt. Die Entladungen entstehen von Chaos. Der Entladungstern der Volumeneigenschaften des Kristalls entspricht und nicht der Grenzbedingungen. Die Entladungen zerstören sich einander bei Wechselwirkung. Darum sind die Streamer-Entladungen in Halbleitern im Rahmen entsprechender Einstellung zu beschreiben.

РЕЗЮМЕ

Сформулирована гипотеза о том, что кристаллографически ориентированные стримерные разряды в полупроводниках принадлежат к классу кооперативных самоорганизующихся процессов. Об этом свидетельствуют следующие свойства: разряды возникают в открытой термодинамической системе, сильно отклоненной от термодинамического равновесия; имеются предпосылки согласованного поведения электронной, фотонной и фононной систем в процессе развития разряда и для удовлетворения универсального критерия о минимальном производстве энтропии. Возникновение разрядов носит пороговый характер. Они возникают из хаоса. Звезда разрядов отражает объемные свойства кристалла, а не граничные условия. Разряды разрушают друг друга при взаимодействии. Поэтому стримерные разряды в полупроводниках следует описывать в рамках соответствующих подходов.